

# 적외선 소자 기반의 촉각센서를 가진 근전의를 개발

## Development of Myoelectric Hand with Infrared LED-based Tactile Sensor

정 동 현, 추 준 옥, 이 연 정\*  
(Dong-Hyun Jeong, Jun-Uk Chu, and Yun-Jung Lee)

**Abstract:** This paper proposes an IR (infrared) LED (Light Emitting Diode)-based tactile fingertip sensor that can independently measure the normal and tangential force between the hand and an object. The proposed IR LED-based tactile sensor has several advantages over other technologies, including a low price, small size, and good sensitivity. The design of the first prototype is described and some experiments are conducted to show output characteristics of the proposed sensor. Furthermore, the effectiveness of the proposed sensor is demonstrated through anti-slip control in a multifunction myoelectric hand, called the KNU Hand, which includes several novel mechanisms for improved grasping capabilities. The experimental results show that slippage was avoided by simple force control using feedback on the normal and tangential force from the proposed sensor. Thus, grasping force control was achieved without any slippage or damage to the object.

**Keywords:** infrared LED, tactile fingertip sensor, multifunction myoelectric hand

### 1. 서론

인간의 손은 뇌의 운동 및 감각영역 대뇌피질(motor and sensory cortex)에서 가장 많은 부분을 차지하는 기관으로서 많은 근육과 감각기관을 이용하여 다양하고 섬세한 동작을 수행할 수 있다. 따라서 손이나 팔이 절단된 환자는 일상생활에서 많은 어려움을 겪게 되며, 상실한 손을 대체할 수 있는 의수의 도움을 필요로 한다. 절단환자가 착용하는 의수는 인간의 손과 유사한 크기, 무게 및 외형을 가지도록 설계되어야 하며, 인간의 손이 가진 가장 기본적 기능인 파지능력(grasping capabilities)을 갖추어야 한다. 기존의 연구들은 의수를 작고 가볍게 유지하면서도 다양한 파지동작을 수행할 수 있는 메커니즘 개발에 초점을 두었다[1-8]. 최근 들어서는 안정적인 파지동작을 위해 물체의 상태를 파악할 수 있는 촉각센서에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 물체의 무게, 마찰계수와 같은 사전정보를 알 수 없는 상황에서 파지력(grasping force) 제어를 통해 미끄러짐(slippage)을 방지하기 위해서는 물체와의 접촉면에서 발생하는 수직력(normal force) 및 수평력(tangential force)을 측정해야 한다. 이러한 기능을 가진 촉각센서를 이용한다면 외력이나 물체의 무게변화에 의해 발생하는 미끄러짐을 방지할 수 있으며, 사용자의 부가적인 주의를 필요로 하지 않는다는 장점이 있다.

촉각센서를 의수에 적용한 첫 번째 예로서 Otto Bock사의 SUVA sensor hand가 있다[9]. 엄지의 끝에 부착된 센서는 탄성체 저항(FSR: Force Sensing Resistor)과 방사형 전극을 이용하여 파지된 물체와 엄지 사이에 발생하는 수직력과 수평력의 합 벡터를 측정할 수 있다. 그러나 센서의 감도가 낮아 미세한 변화를 감지할 수 없었으며 많은 경우에서 물체의 미끄러짐을 방지할 수 없었다. MANUS hand는 홀 센서와 영구

자석 사이에 선형스프링을 두어 선형적인 수직력을 측정하였다[10]. 그러나 이는 수직력만을 측정할 수 있으므로 파지력 제어를 위한 내부 되먹임 센서로만 사용되었다. Oxford hand는 수직력을 측정하기 위해 FSR을 사용하였고 물체의 초기 미끄러짐에 의해 발생하는 음파신호를 감지하기 위해 마이크로폰을 이용하였다[10]. 이와 함께 로봇 손 분야에서도 촉각센서 연구가 활발히 진행되고 있다. SKKU hand는 압전 재료 기반의 폴리비닐리덴 디플루오라이드 (PVDF: Polyvinylidene Fluoride) 필름과 압력에 변화를 가지는 저항잉크를 이용하여 각각 초기 미끄러짐과 수직력을 감지하였다[11]. 또한 NAIST hand는 수직력과 수평력 감지를 위해 각각 압력센서와 카메라를 사용하였다[12]. 투명한 반구 젤 속에 작은 카메라를 두고 반구 젤의 꼭지점에 위치한 특징점의 변화를 관찰함으로써 초기 미끄러짐을 감지하였다. 이와 같이 다양한 방법으로 촉각센서들이 연구되었지만 아직 의수에 적용하기에는 크기와 무게에서 적합하지 않으며 큰 용량의 전원과 복잡한 인터페이스가 필요한 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 작은 크기,싼 가격, 높은 감도를 가지는 적외선 소자 기반의 촉각센서를 제안한다. 수직력과 수

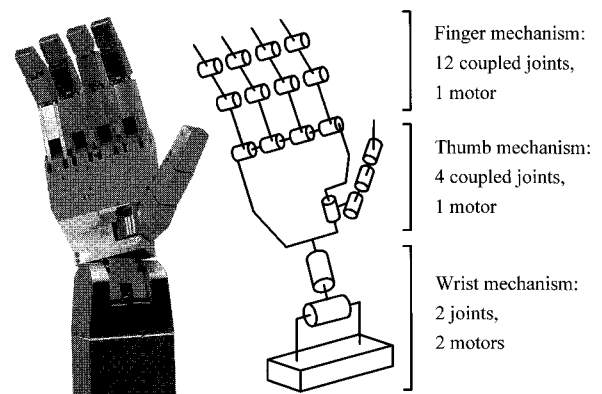


그림 1. KNU hand 의 설계개념과 제약조건.  
Fig. 1. Design concept and constraints of KNU hand.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 2. 27., 수정: 2009. 4. 13., 채택확정: 2009. 5. 27.

정동현, 추준옥, 이연정: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

(dhjeong@korea.kr/juchu@kist.re.kr/yjlee@ee.knu.ac.kr)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00655).

평력을 동시에 그리고 독립적으로 측정할 수 있는 설계 구조를 설명하고 실험을 통해 출력 특성을 조사함으로써 제안한 촉각센서의 유효성을 보인다. 이와 함께 새로운 근전 의수(myoelectric hand)를 제안한다. 개발한 의수는 새로운 메커니즘을 이용하여 향상된 파지능력을 가지며, 상지 절단환자가 자신의 의도에 따라 의수를 동작시킬 수 있도록 근전도 인터페이스를 제공한다. 통합 실험에서는 근전 의수가 적외선 소자 기반의 촉각센서로부터 측정된 수직력과 수평력을 이용하여 파지력을 제어함으로써 물체의 미끄러짐을 방지할 수 있음을 보인다.

II. 근전 의수

이 장에서는 다자유도, 다기능을 가지면서도 소형, 경량화가 가능한 근전 의수 설계방법을 소개한다. 제안한 KNU hand는 설계개념으로서 다음과 같은 기능적인 특징을 포함한다(그림 1 참조). 첫째, 모든 손가락은 물체와의 접촉면을 증가시키기 위해 독립적인 굴곡이 가능하다. 둘째, 모든 손가락은 외력에 의한 신전을 방지할 수 있도록 자동잠김 기능을 가진다. 셋째, 각 손가락에서 세 개의 마디들은 물체와의 접촉면을 늘이기 위해 독립적인 굴곡이 가능하다. 넷째, 엄지는 수근중수관절(carpometacarpal joint)에서 굴곡/신전과 함께 내전/외전이 가능하다. 다섯째, 손목은 굴곡/신전 및 내회전/외회전 기능을 가진다. 이와 함께 다음과 같은 제약조건을 가진다. 첫째, 다섯 개의 손가락을 위한 모터는 2개로 제한하며 손바닥에 위치한다. 둘째, 손목을 위한 모터는 2개로 제한하며 전완에 위치한다. 제작된 KNU hand의 사양은 표 1과 같으며, 다음 절에서는 이와 같이 단지 4개의 모터만으로 18 자유도를 구현하기 위해 제안된 저차구동 메커니즘(under-actuated mechanism)을 설명한다.

1. 손가락 사이의 적응파지 및 자동잠김 메커니즘

하나의 모터로 각각의 손가락을 독립적으로 굴곡할 수 있는 적응파지(adaptive grasping) 기능은 나선 스프링(spiral spring)을 이용하여 구현한다. 하나의 모터 축에 연결된 4개의 나선 스프링은 각각의 중수수지관절(metacarpophalangeal joint)에 위치하며 손가락 메커니즘에 연결된다. 모터 축의 회전으로 어떤 손가락이 물체와 접촉하였을 때 그에 해당하는 나선 스프링이 감김(winding)으로써 다른 손가락들이 계속해서 굴곡동작을 유지할 수 있도록 한다. 따라서 임의의 형상을 가진 물체에 대하여 다섯 개의 손가락은 서로 다른 굴곡각도를 가짐으로써 안정적인 파지동작이 가능하다. 그러나 나선 스프

표 1. KNU hand의 사양.

Table 1. Specifications of KNU hand.

Components	Specifications	
	Hand	Wrist
Dimensions (mm)	190L × 90W × 30H	100L × 70W × 40H
Weight (g)	800	200
Degrees of freedom	16	2
Actuators	Two DC motors	Two DC motors
Sensors	Two potentiometers	Two potentiometers
Grasping force (N)	Max. 60	
Motion controller	TMS320F2812	
Materials	Aluminum and stainless steel	

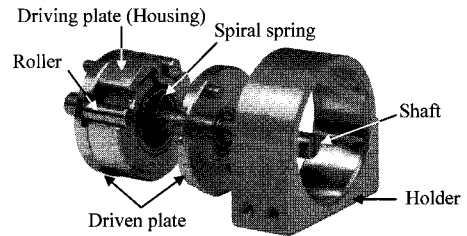


그림 2. 중수수지관절 모듈.  
Fig. 2. Metacarpophalangeal joint module.

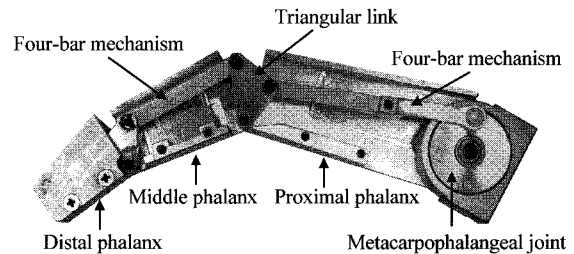


그림 3. 손가락 모듈.  
Fig. 3. Finger module.

프링이 완전하게 감기지 않은 상태에서 물체의 무게가 변화하거나 사용자가 손목이나 팔을 움직일 경우, 외력에 의해 손가락이 신전되는 문제점이 있다. 또한 물체를 파지하는 동안에 나선 스프링의 감김을 유지하기 위해서는 지속적인 토크를 공급해야 함으로 배터리를 전원으로 사용하는 근전 의수의 경우 장시간 사용이 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 캠-롤러를 이용한 새로운 형태의 자동잠김(self-locking) 메커니즘을 소개한다. 제안한 캠-롤러는 모터 축과 나선스프링으로 연결된 구동판이 회전할 경우에만 피구동판의 회전이 가능하다. 반면에 손가락 메커니즘과 연결된 피구동판은 외력이 발생할 경우에 캠과 롤러의 감(wedging) 동작에 의해 회전이 방지된다. 그림 2는 나선 스프링과 캠-롤러 메커니즘을 이용하여 제작된 중수수지관절이며, 자세한 설명은 참고문헌 [13]에 기술되어 있다.

2. 손가락 메커니즘

손가락 마디 사이의 적응파지 기능을 위하여 7링크 메커니즘 [14]에 근거한 저차구동 손가락을 제안한다. 그림 3과 같이 근위지골(proximal phalanx)은 4링크 메커니즘에서 한 개 링크를 제거함으로써 피구동판에서 두 개의 힌지판과 연결된다. 또한 중위지골(middle phalanx)은 4링크 메커니즘으로 구성되고 삼각형 링크(triangular link)를 통해 인접한 근위지골과 연결된다. 마지막으로 원위지골(distal phalanx)은 중위지골의 4링크 메커니즘과 연결된다. 이러한 구조는 근위지골로부터 원위지골로 이어지는 순차적 접촉을 통해 적응파지를 수행할 수 있다.

3. 엄지 메커니즘

엄지는 특별히 4자유도를 가진다. 즉, 앞서 제안한 손가락 메커니즘의 적응파지 기능과 함께 수근중수 관절에서 내전/외전을 수행할 수 있다. 여기서 내전/외전은 간헐 메커니즘(intermittent mechanism)으로 구현한다. 이러한 메커니즘은 Manus hand [8]에서 타이밍 기어(timing gear)로 구현된 예가 있

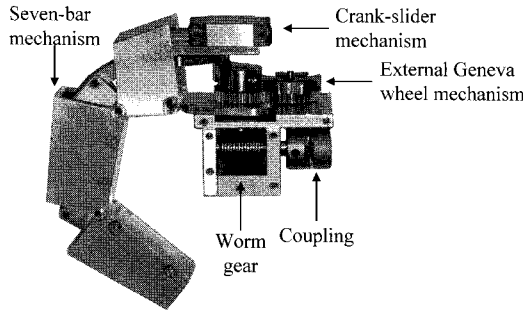


그림 4. 엄지 모듈.  
Fig. 4. Thumb module.

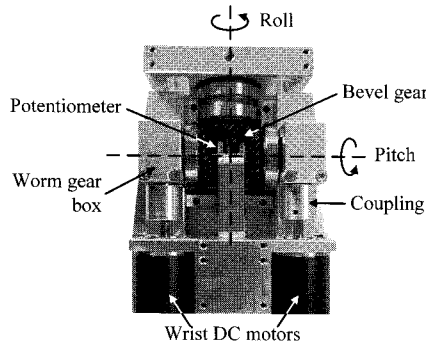


그림 5. 손목 모듈.  
Fig. 5. Wrist module.

으나, 지절관절(interphalangeal joint)의 운동이 수근중수관절로부터 독립적이지 못하며 모터의 동력을 전달하기 위해 복잡한 경로가 요구된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 외부 제네바 휠(external Geneva wheel) 메커니즘과 크랭크-슬라이더(crank-slider) 메커니즘을 사용한 엄지설계를 제안한다. 그림 4에서 제작된 엄지의 구조를 보인다. 하나의 모터에 연결된 웜기어 박스는 엄지의 모든 관절을 구동시키며 동시에 자동잠김 기능을 수행한다. 모터축의 회전각도는 0 ~ 450°의 범위를 가지며 구간별로 서로 다른 동작을 수행할 수 있다. 즉, 내전/외전은 외부 제네바 휠에 의해 225 ~ 315°의 각도에 서만 간헐적으로 동작될 수 있다. 반면에 0 ~ 225° 그리고 315 ~ 450°에서는 외부 제네바 휠의 회전운동이 크랭크-슬라이더에 의해 직선 왕복운동으로 변화되며, 손가락 메커니즘과 연결되어 원형 및 측면파지에서의 굴곡/신전으로 동작된다.

4. 손목 메커니즘

손목은 2개의 DC모터, 웜기어 박스, 그리고 3개의 베벨기어로 구성된다(그림 5 참조). 웜기어는 구동축의 방향을 변화시키며 동력차단 시에 자동잠김 기능을 수행한다. 또한 3개의 베벨기어를 이용하여 롤(roll)과 피치(pitch)의 2 자유도를 구현한다. 따라서 손목 동작은 2개 모터의 회전방향에 따라 굴곡/신전 및 내회전/외회전을 수행할 수 있다.

5. 근전 제어

근육 수축에서 발생하는 근전도를 이용하여 사용자의 의도를 인식하고 그에 따라 의수를 제어하는 방법을 근전 제어(myoelectric control)라 한다. 절단환자는 자신의 의도에 따라 잔존근육을 선택적으로 수축시킬 수 있으며, 이때 발생하는 근전도의 절대 평균값(mean absolute value)은 근육의 수축 정

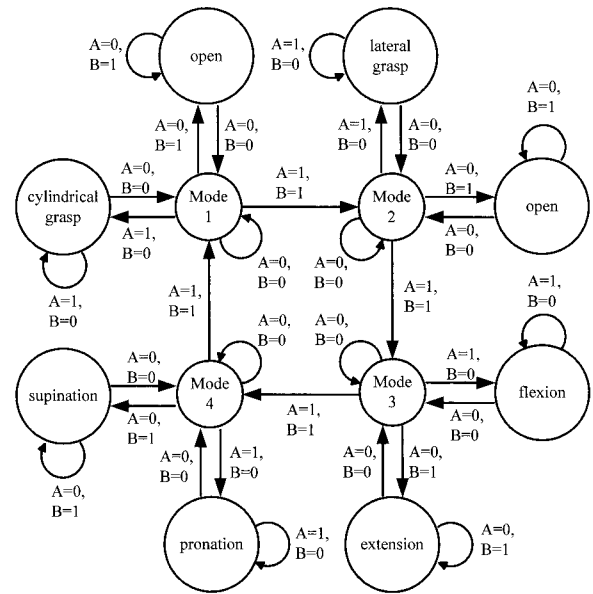


그림 6. 모드 변환 알고리즘.  
Fig. 6. Mode transformation algorithm.

도와 비례한다. 이와 같은 사실로부터 미리 정해진 문턱치(threshold)와 근전도의 절대 평균값을 비교함으로써 이산화된 의수 제어명령을 생성할 수 있다. 예를 들어 2개의 근전도에 해당하는 변수를 A와 B라고 하고, 절대 평균값이 문턱치 보다 클 경우를 1, 그렇지 않은 경우를 0이라 하면, 4가지의 상태, (A=0, B=0), (A=1, B=0), (A=0, B=1), 그리고 (A=1, B=1)를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 2개의 근전도로부터 손의 원형파지, 측면파지, 펌 동작과 손목의 굴곡/신전, 내회전/외회전, 그리고 휴지동작을 포함하는 8개의 동작을 인식한다. 이를 위하여 그림 6과 같은 모드 변환 알고리즘을 제안한다. 먼저 4가지 모드를 정의하고, 각각의 모드에 2가지의 동작을 할당한다. 예를 들어, 최초 제어부에 전원이 투입되면 모드 1만 수행이 가능하고 다른 모드는 수행이 불가능하다. 다음으로 변수 A에 해당되는 하나의 근육만을 수축하였을 때, 근전도의 수는 모드 1에서 원형파지 동작을 수행한다(A=1, B=0). 반대로 변수 B에 해당되는 하나의 근육만을 수축한다면, 근전도의 수는 모드1에서 펌 동작을 수행한다(A=0, B=1). 다음으로 모드 1에서 모드 2로의 변환은 2개의 근육을 동시에 수축하여 절대 평균값이 모두 미리 설정된 문턱치 보다 크게 된 후 (A=1, B=1), 근육의 수축이 해제되어 문턱치 보다 작아지면 이루어진다(A=0, B=0). 이와 같은 방법으로 모드1에서 모드4까지 순차적으로 모드를 변환할 수 있으며 각 모드에서 의도하는 동작을 선택하여 수행할 수 있다.

III. 촉각센서

파지하는 물체의 마찰계수와 무게에 대한 사전정보를 모르는 상태에서 파지력 제어를 통해 미끄러짐을 방지하기 위해서는 촉각센서로부터 접촉면에 작용하는 수직력과 수평력을 동시에 독립적으로 측정해야 한다. 이를 위하여 우수한 광투과율을 가진 탄성체와 광소자를 이용한 촉각센서를 제안한다. 광학적 경로를 이용한 촉각센서는 기존 연구에서 다양한 형태로 개발되어 왔다. 사용자 인터페이스나 로봇의 외

피에 적용할 목적으로 개발된 적외선 소자 기반의 매트릭스 센서는 넓은 범위에서 점접촉의 수직력과 위치를 판별할 수 있다[15,16]. 반면에, 로봇손을 위한 촉각센서의 경우에는 반구형에 광섬유를 배치하고 광경로의 변화를 카메라로 인식함으로써 수직력과 수평력 측정하였다[17]. 본 연구에서는 작은 공간에서 수직력과 수평력을 측정할 수 있도록 적외선 소자에 기반하여 새로운 광학적 경로를 가진 촉각센서를 제안한다.

1. 적외선 소자 기반의 촉각센서의 구조

그림 7에서 적외선 소자 기반의 촉각센서 구조를 보인다. 제안한 촉각센서는 한 개의 발광부(emitter), 두 개의 수광부(detector), 회로기판(substrate), 플런저(plunger), 폴리디메틸 실록산 (PDMS : Polydimethyl-Siloxane), 접촉면(surface)으로 구성된다. 발광부는 KODENSHI사의 KEL-0315C로 표면실장 형태의 적외선 발광 다이오드이며, 수광부는 KST-0315A로 표면실장 형태의 고감도 광 트랜지스터이다. PDMS는 우수한 광투과율, 고탄성, 뛰어난 온도 안정성, 생체적합성을 가지고 있다. 따라서 제안한 구조에서 회로기판 사이에 채워져 외력에 의한 변형과 초기상태로의 복원을 가능케 한다. 또한 적외선이 손실되지 않고 투과할 수 있는 경로를 제공한다. 마지막으로 접촉면에는 고무패드를 붙임으로써 물체와의 마찰 계수를 높인다. 발광부와 수광부 1은 아래쪽 회로기판에 나란하게 배치하고, 플런저는 위쪽 회로기판에 고정시킨다. 따라서 수직력이 작용할 때 발광부로부터 나오는 적외선이 플런저에 의해 차단되며 수광부 1로 흡수되는 적외선의 양이 감소한다. 수광부 2는 발광부와 마주 보도록 위쪽 회로기판에 고정시킨다. 따라서 수평력이 작용할 때 수광부 2의 위치가 변함으로써 수광부 2로 흡수되는 적외선의 양이 감소한다. 그림 8은 제작된 적외선 소자 기반의 촉각센서이다. 엄지와 나머지 네 개의 손가락 끝에 부착되는 촉각센서의 크기는 각각 15W × 25D × 7H mm와 12W × 18D × 7H mm이다.

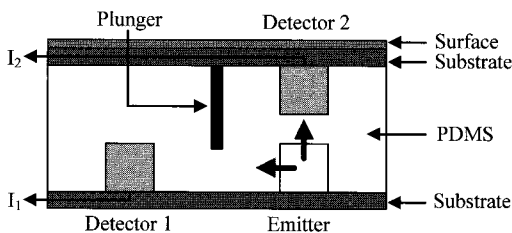


그림 7. 적외선 소자 기반의 촉각센서 구조.  
Fig. 7. Structure of IR LED-based tactile sensor.

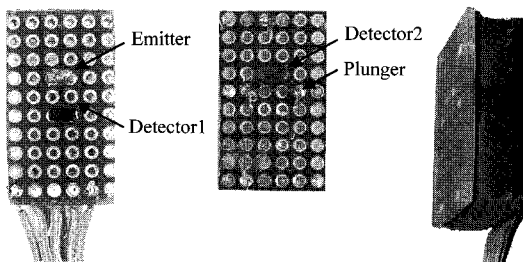


그림 8. 제작된 적외선 소자 기반의 촉각센서.  
Fig. 8. Developed IR LED-based tactile sensor.

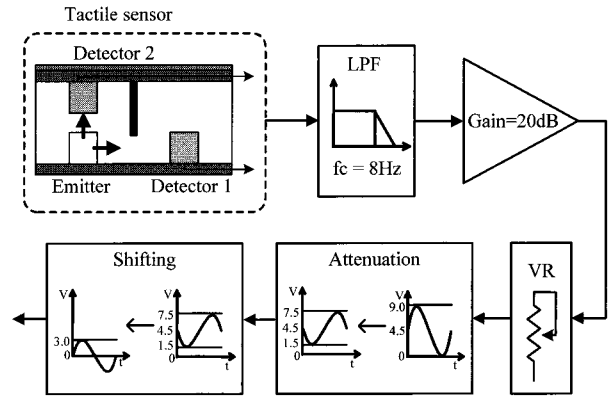


그림 9. 촉각센서의 신호처리 블록도.  
Fig. 9. Signal processing block diagram for tactile sensor.

2. 촉각센서의 신호처리

그림 9는 적외선 소자 기반의 촉각센서를 위한 신호처리 블록도이다. 먼저 수직력 또는 수평력에 의해 변화되는 수광부 전류신호에 대해 8 Hz 차단 주파수를 가진 저역통과 필터를 사용하여 잡음을 제거한다. 다음으로 20 dB 이득으로 증폭하고, 가변저항으로 적외선 소자들 사이의 오프셋 출력을 보정한다. 최종적으로 DSP의 A/D 컨버터와의 연결을 위해 감쇠 회로와 시프트 회로를 거친다. DSP의 A/D 컨버터는 0 ~ 3 V의 입력범위를 가지는 반면, 저역통과 필터와 증폭기에 사용된 연산 증폭기는 0 ~ 9 V 출력전압 범위를 가진다. 따라서 감쇠 회로에서 촉각센서의 출력전압을 1.5 ~ 7.5 V로 감쇠하고, 시프트 회로에서 -3 ~ 3 V의 출력전압 범위로 이동시킨다. 제안한 촉각센서는 적외선의 감소에 따라 수직력 또는 수평력을 측정함으로써 0~3V의 출력범위만을 이용한다.

3. 촉각센서의 출력특성

제안한 촉각센서의 출력특성을 평가하기 위해 독립적인 수직력 및 수평력 인가 실험을 수행하였다. 제안하는 촉각센서는 하나의 발광부로부터 나오는 적외선이 수광부1과 수광부2로 흡수된다. 그리고 외력의 작용에 따라 각각의 수광부에서 받아 들이는 적외선의 양이 변화한다. 그림 10에서와 같이 수직력이 작용한다면 PDMS가 압축되며 플런저가 발광부와 수광부 1 사이를 차단함으로써 수광부 1에서 흡수되는 적외선의 양이 감소하게 된다. 그림 11에서 수직력의 증가 및 감소에 따른 촉각센서의 출력특성 그래프를 보인다. 제안하는 촉각센서의 수직력 출력전압과 인가된 수직력 사이에 비례적 관계를 확인할 수 있었으며, 약 0 ~ 12 N 사이의 힘을 감지할 수 있었다. 반면에, 수평력의 변화를 감지하기 위해 수광부 2는 발광부와 마주보는 곳에 위치한다. 따라서 어떠한 방향으로의 수평력에 대해서도 동일한 출력특성을 가질

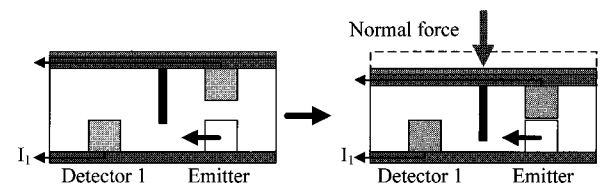


그림 10. 수직력의 작용.  
Fig. 10. Operation of normal force.

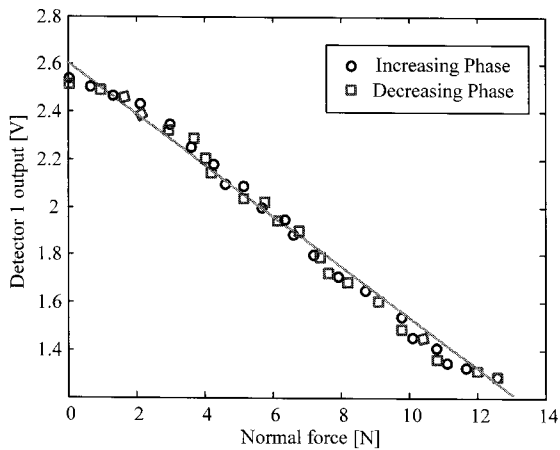


그림 11. 수직력 변화에 따른 센서 출력특성.  
Fig. 11. Sensor output characteristic as variation of normal force.

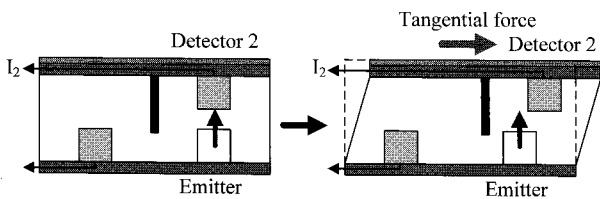


그림 12. 수평력의 작용.  
Fig. 12. Operation of tangential force.

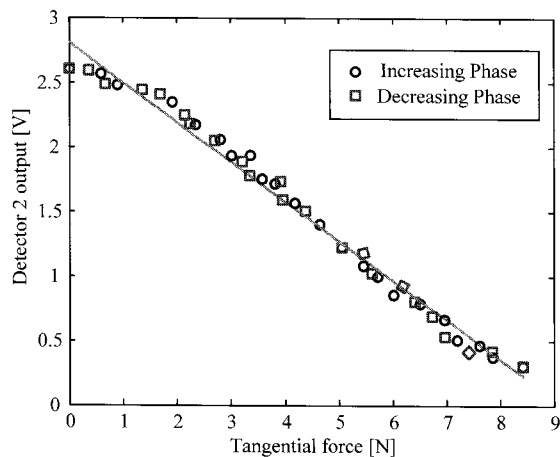


그림 13. 수평력 변화에 따른 센서 출력특성.  
Fig. 13. Sensor output characteristic as variation of tangential force.

수 있다. 그림 12에서와 같이 수평력이 증가할 때 PDMS의 변형이 생기며 수광부 2의 위치가 변하게 되어 흡수하는 적외선의 양이 감소하게 된다. 그림 13에서 수평력의 증가 및 감소에 따른 촉각센서의 출력특성 그래프를 보인다. 이 경우에도 제안하는 촉각센서의 수평력 출력전압과 인가된 수평력 사이에 비례적 관계를 확인할 수 있었으며, 약 0 ~ 8 N 사이의 힘을 감지할 수 있었다.

4. 촉각센서의 성능실험

그림 14에서 수직력 및 수평력을 동시에 인가하고 촉각센서의 출력특성을 평가하기 위한 실험구성을 보인다. 제한한 촉각센서는 바이스에 고정되어 있으며 외력이 작용될 수 있

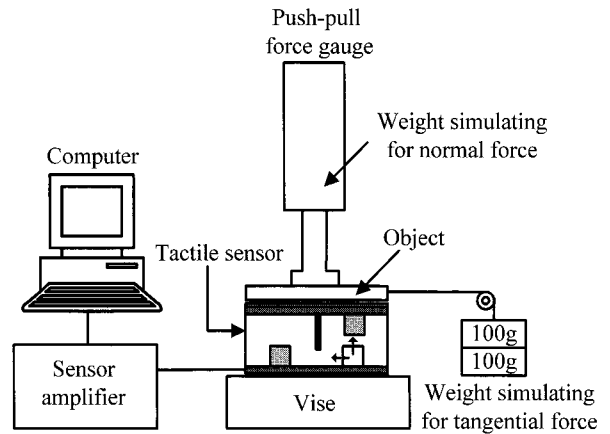


그림 14. 수직력 및 수평력 동시측정을 위한 실험구성.  
Fig. 14. Experimental setup for simultaneous measurement of normal and tangential force.

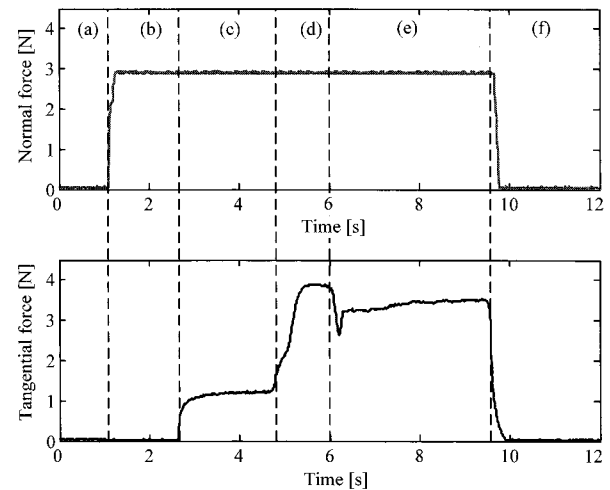


그림 15. 수직력 및 수평력 변화에 따른 센서출력.  
Fig. 15. Sensor outputs as variation of normal and tangential force.

도록 고무패드 표면에 물체를 위치시켰다. AITONICS사의 ARF-50 푸쉬-풀 힘 게이지를 이용하여 수직력을 인가하였으며 고정된 도르래와 무게 추를 이용하여 수평력을 인가하였다. 그림 15는 수직력 및 수평력 변화에 따른 출력결과를 보여준다. 먼저, 구간 (a)는 외력이 작용하지 않은 초기상태이다. 구간 (b)에서는 푸쉬-풀 힘 게이지를 이용하여 약 3 N의 수직력을 인가하였다. 촉각센서의 수직력 출력이 변화됨을 확인할 수 있다. 하지만 수평력 출력은 아무런 변화가 없다. 다음으로 구간 (c)에서는 수평력을 작용하기 위해 도르래에 100 g의 무게 추를 달았으며 그에 해당하는 수평력이 측정됨을 확인할 수 있다. 하지만 기존의 수직력에는 변화가 없었다. 비록 수평력이 작용하였지만 아직 물체와 촉각센서 사이에 미끄러짐은 발생하지 않았다. 구간 (d)에서는 미끄러짐을 유도하기 위해 도르래에 100 g의 무게 추를 추가하였다. 그 결과 수평력 출력이 증가하였으며 구간 (e)에서 미세한 진동과 함께 미끄러짐이 발생한다. 결국 구간 (f)에서는 물체가 촉각센서와 푸쉬-풀 힘 게이지 사이를 이탈하였으며 수직력과 수평력 출력이 제거되었다. 실험결과를 통하여 제안한 촉

각센서가 수직력과 수평력을 동시에 그리고 독립적으로 측정 가능함을 확인할 수 있었다.

**IV. 실험 및 결과**

**1. 파지능력 실험**

KNU hand의 파지능력을 평가하기 위해 근전제어를 제외하고 버튼 입력에 따라 파지동작을 수행하였다. 파지명령은 ‘팜’, ‘원형파지’, 그리고 ‘측면파지’만으로 구성하였다. 그림 16에서 보듯이 ‘원형파지’ 명령으로 (a) 원형 및 (c) 끝점파지가 가능하였으며 ‘측면파지’ 명령으로 (b) 측면 및 (d) 고리파지가 가능하였다. 또한 그림 16(e)와 같이 다양한 형상의 물체에 대해서도 많은 접촉면을 가지면서 안정적인 파지동작을 보였다. 이와 같은 결과는 앞서 제안한 나선스프링 메커니즘과 7링크 메커니즘으로 손가락 사이와 손가락 마디 사이의 적응파지가 가능하였기 때문이다. 또한 외부 제네바 휠 메커니즘과 크랭크-슬라이더 메커니즘은 하나의 모터만을 이용하여 엄지의 굴곡/신전 및 내전/외전을 가능케 하였다.

**2. 자동잠김 실험**

제안한 캠-롤러 메커니즘의 자동잠김 성능을 정량적으로 평가하기 위해 파지력 측정실험을 수행하였다. 그림 17(a)와 같이 KNU hand는 끝점파지를 수행하며 푸쉬-풀 힘 게이지로써 파지력을 측정하였다. 파지력이 가해질 수 있도록 강철판을 푸쉬-풀 힘 게이지와 실험대에 각각 설치하였으며 두 강철판의 거리는 70 mm로 설정하였다. 그림 17(b)에서 보듯이 끝점파지를 수행하여 약 15 N 정도의 파지력이 측정되었을 때 모터를 위한 전원을 차단하였다. 그림에도 불구하고 캠-롤러 메커니즘의 자동잠김 기능에 의해 파지력이 유지됨을 확인할 수 있었다.

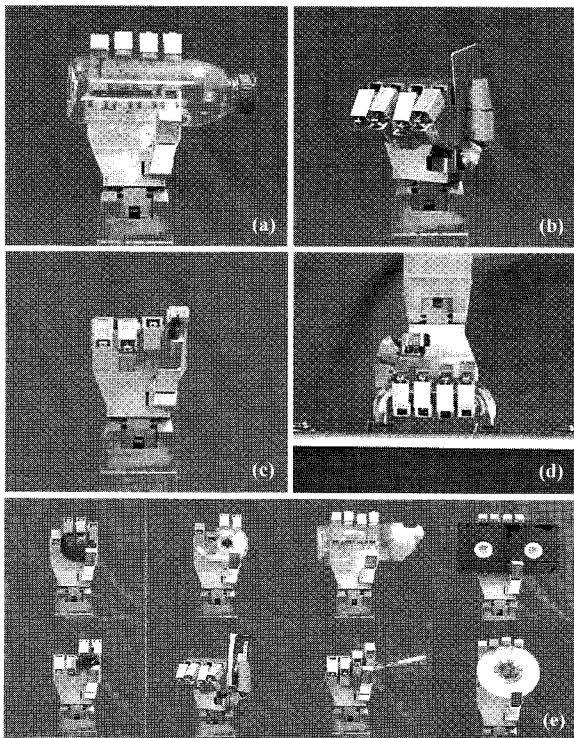


그림 16. KNU hand의 파지동작.  
Fig. 16. Grasping motions of KNU hand.

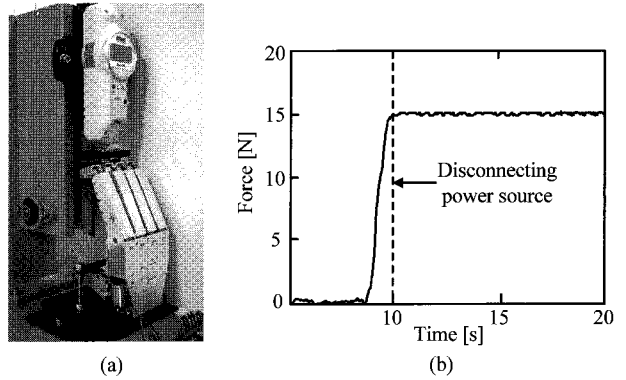


그림 17. 자동잠김 실험 및 결과.  
Fig. 17. Self-locking test and result.

**3. 근전제어 실험**

근전제어 실험은 정상인을 대상으로 수행하였으며 전완의 노쪽 손목 굽힘근과 자쪽 손목 펴근에 각각 근전도 센서를 부착하였다. 능동형 표면 근전도 센서는 60 dB의 증폭비와 20 ~ 450 Hz의 통과대역을 가지도록 제작하였다. 또한 가변중

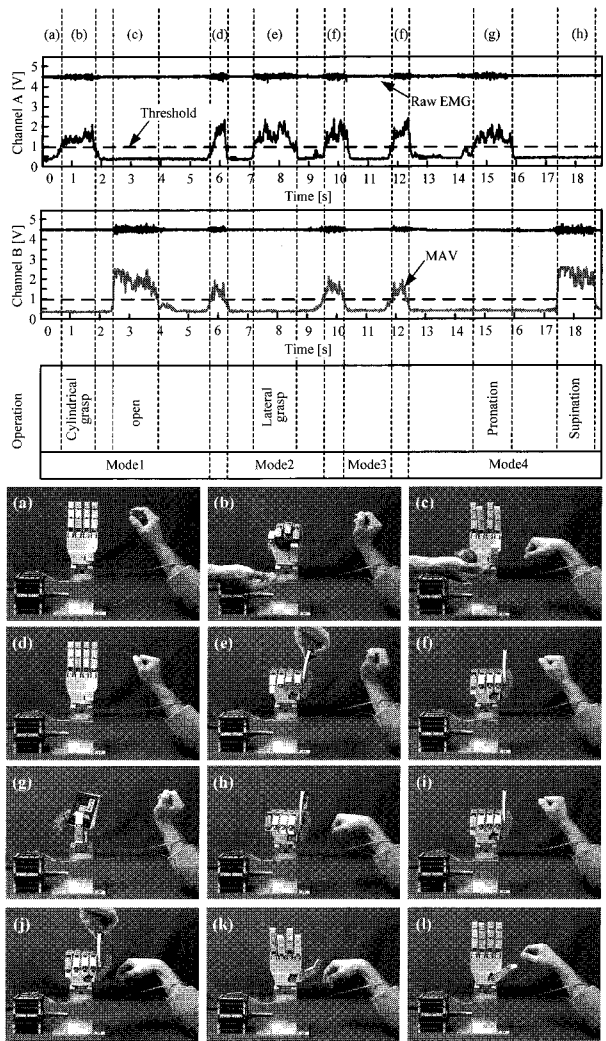


그림 18. KNU hand의 근전제어.  
Fig. 18. Myoelectric control of KNU hand.

폭, 정류, 감쇠 및 시프트 회로를 이용하여 근전도의 절대 평균값을 얻었으며 문턱치와의 비교에 사용하였다. 정상인의 경우에 휴지동작 ( $A=0, B=0$ ), 손목의 굴곡동작 ( $A=1, B=0$ )과 신전동작 ( $A=0, B=1$ ), 그리고 주먹 쥐 동작 ( $A=1, B=1$ )으로 앞서 설명한 4가지 상태를 얻을 수 있었다. 그림 18에서 실험으로부터 얻어진 두 채널의 근전도와 그에 따른 근전도의 동작을 보인다. 구간 (a)는 초기상태로서 모드 1로 설정되어 있으며 휴지동작 상태이다. 구간 (b)에서는 사용자의 손목 신전동작으로 KNU hand가 원형파지 동작을 수행하였으며 구간 (c)에서 사용자의 손목 굴곡동작으로 KNU hand가 물체를 내려놓았다. 다음으로 구간 (d)에서는 사용자의 주먹 쥐 동작으로 모드 1에서 모드 2로 변환이 이루어졌으며 구간 (e)에서 KNU hand가 측면파지를 수행하였다. 구간 (f)에서는 두 번의 주먹 쥐 동작으로 모드 4로 이동하였으며 그 결과 KNU hand는 구간 (g)-(h)에서 측면파지를 유지한 상태에서 손목의 내회전 및 외회전을 수행하였다. 이와 같이 두 채널의 근전도와 제한한 모드 변환 알고리즘을 이용하여 사용자가 의도하는 다양한 동작을 인식할 수 있었으며 KNU hand를 위한 동작명령을 생성할 수 있었다.

4. 촉각센서를 이용한 미끄러짐 방지 제어 실험

그림 19는 적외선 소자 기반의 촉각센서를 이용한 미끄러짐 방지 제어시스템의 블록도이다. 측정된 수직력을 되먹임함으로써 수직력 제어기가 기준값을 추종하도록 한다. 이와 함께 미끄러짐 방지 제어기는 수평력의 변화에 비례하여 수직력 기준값을 증가시킴으로써 미끄러짐을 방지한다. 그림

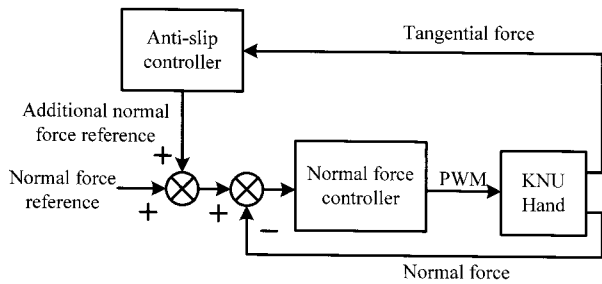


그림 19. 미끄러짐 방지 제어를 위한 블록도.

Fig. 19. Block diagram of anti-slip control.

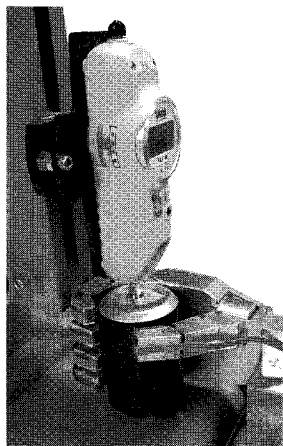


그림 20. 미끄러짐 방지 제어를 위한 실험구성.

Fig. 20. Experimental setup for anti-slip control.

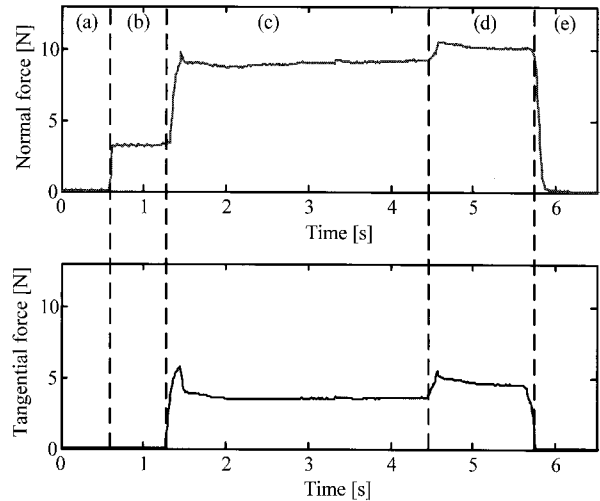


그림 21. 미끄러짐 방지 제어의 실험결과.

Fig. 21. Experimental results of anti-slip control.

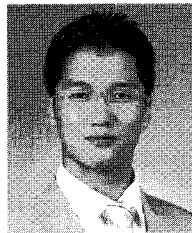
20에서 촉각센서를 가진 KNU hand의 미끄러짐 방지 제어 실험구성을 보인다. KNU hand는 물체를 원형으로 파지하도록 설정되었으며 푸쉬-풀 힘 게이지를 이용하여 촉각센서에 수평력이 작용하도록 물체에 아래방향으로 미는 힘을 인가하였다. 미끄러짐 방지 제어에서는 엄지 끝에 부착된 촉각센서의 출력만을 이용하였으며 초기 수직력 기준값을 3 N으로 설정하였다. 실험을 통해 엄지 끝에 부착된 촉각센서가 측정된 수직력과 수평력을 그림 21에서 보인다. 구간 (a)는 초기 상태이며 구간 (b)에서 KNU hand가 초기 수직력 기준값으로 물체를 원형파지 하였다. 다음으로 구간 (c)에서 푸쉬-풀 힘 게이지를 이용하여 물체에 아래방향으로 미는 힘을 인가하였다. 그 결과 촉각센서에서 수평력의 변화가 검출되었으며 미끄러짐 방지 제어기는 이에 비례하도록 수직력 기준값을 증가시켰다. 구간 (d)에서는 구간 (c)에서 보다 작은 수평력 변화를 유도하였으며 수직력의 증가도 그에 비례하여 조금 증가하였다. 마지막으로 구간 (e)에서는 KNU hand가 펌 동작을 수행함으로써 촉각센서의 출력이 초기화 되었다. 이 실험에서 제한한 촉각센서를 근전도의수에 적용하여 물체와의 접촉면에서 발생하는 수직력과 수평력을 측정할 수 있었으며 간단한 미끄러짐 방지 제어를 통해 물체를 안전하게 파지할 수 있음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 적외선 소자 기반의 촉각센서를 가진 근전 의수를 제안하였다. 먼저, 다양한 저차구동 메커니즘을 이용하여 4개의 모터만으로 18자유도를 가질 수 있는 근전 의수를 설계, 제작하였다. 적응파지와 자동잡김 기능을 통해 물체를 안정적으로 파지할 수 있었으며 다양한 파지동작이 가능 하였다. 제한한 모드 변환 알고리즘은 2개의 근전도로부터 사용자의 의도에 따라 8가지의 손동작을 구분함으로써 근전 의수의 동작명령을 생성할 수 있었다. 마지막으로 제안한 적외선 소자 기반의 촉각센서는 수직력과 수평력을 독립적으로 동시에 측정 가능하였으며 간단한 미끄러짐 방지 제어를 통해 물체를 안정적으로 파지할 수 있었다.

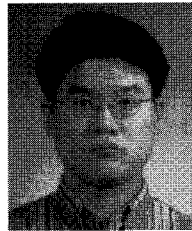
## 참고문헌

- [1] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and S. Naumann, "Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 36, pp. 1157-1173, 2001.
- [2] M. C. Carrozza, C. Suppo, F. Sebastiani, B. Massa, F. Vecchi, R. Lazzarini, M. R. Cutkosky, and P. Dario, "The SPRING hand: Development of a self-adaptive prosthesis for restoring natural grasping," *Autonomous Robots*, vol. 16, pp. 125-141, 2004.
- [3] B. Massa, S. Roccella, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Design and development of an underactuated prosthetic hand," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3374-3379, 2002.
- [4] A. M. Dollar and R. D. Howe, "The SDM hand as a prosthetic terminal device: A feasibility study," in *Proc. IEEE Int. Conf. Rehabilitation Robotics*, pp. 978-983, 2007.
- [5] P. J. Kyberd, C. Light, P. H. Chappell, J. M. Nightingale, D. Whatley, and M. Evans, "The design of anthropomorphic prosthetic hands: A study of the southampton hand," *Robotica*, vol. 19, pp. 593-600, 2001.
- [6] J. Zhao, L. Jiang, S. Shi, J. Cai, H. Liu, and G. Hirzinger, "A five-fingered underactuated prosthetic hand system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*, pp. 1453-1458, 2006.
- [7] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. Edin, L. Beccai, and C. Cipriani, "Design of a cybernetic hand for perception and action," *Biological Cybernetics*, vol. 95, pp. 629-644, 2006.
- [8] J. L. Pons, E. Rocon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, and W. Moorleghe, "The MANUS-HAND Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects," *Autonomous Robots*, vol. 16, pp. 143-163, 2004.
- [9] Otto Bock Health Care, MYOBOCK Arm Components, 2005.
- [10] P. J. Kyberd and J. L. Pons, "A Comparison of the Oxford and Manus Intelligent Hand Prostheses," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 14-19, 2003.
- [11] B. J. Choi, S. H. Lee, and H. R. Choi, "Development of Anthropomorphic Robot Hand with Tactile Sensor : SKKU Hand II," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 3779-3784, 2006.
- [12] J. Ueda, Y. Ishida, M. Kondo, and T. Ogasawara, "Development of the NAIST-Hand with Vision-based Tactile Fingertip Sensor," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2332-2337, 2005.
- [13] J. U. Chu, D. H. Jung, and Y. J. Lee, "Design and Control of a Multifunction Myoelectric Hand with New Adaptive Grasping and Self-locking Mechanisms," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 743-748, 2008.
- [14] T. Laliberte and C. M. Gosselin, "Under-actuation in space robotic hands," in *Proc. Int. Symp. Artificial and Robotics & Automation in Space*, pp. 18-22, 2001.
- [15] J. Rossiter and T. Mukai, "A Novel Tactile Sensor Using a Matrix of LEDs Operating in Both Photoemitter and Photodetector Modes," in *Proc. IEEE Sensors 2005*, pp. 994-997, 2005.
- [16] J. Rossiter and T. Mukai, "An LED-based Tactile Sensor for Multi-sensing over Large Areas," in *Proc. IEEE Sensors 2006*, pp. 835-838, 2006.
- [17] M. Ohka, H. Kobayashi, J. Takata, and Y. Mitsuya, "Sensing Precision of an Optical Three-axis Tactile Sensor for a Robotic Finger," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 214-219, 2006.



## 정동현

2007년 영남대 전자정보통신공학부(학사). 2009년 경북대 전자전기컴퓨터학부(석사). 2009년~현재 국립재활원 재활연구소 연구원. 관심분야는 재활보조로봇.



## 추준욱

1998년 영남대 전기공학과(학사). 2000년 경북대 전자공학과(석사). 2009년 경북대 전자공학과(박사). 2002년~2006년 재활공학연구소 선임연구원. 2009년~현재 한국과학기술연구원 의과학센터 박사후과정. 관심분야는 생체신호 처리, 패턴인식, 지능제어.



## 이연정

1984년 한양대 전자공학과(학사). 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사). 1995년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수. 관심분야는 보행로봇, 서비스로봇, 임베디드 시스템.