

인간손의 동작과 모양을 모방한 휴머노이드 로봇손 설계

Design of a Humanoid Robot Hand by Mimicking Human Hand's Motion and Appearance

안 상 익, 오 용 환, 권 상 주*
(Sang-ik Ahn, Yonghwan Oh, and SangJoo Kwon)

Abstract : A specialized anthropomorphic robot hand which can be attached to the biped humanoid robot MAHRU-R in KIST, has been developed. This built-in type hand consists of three fingers and a thumb with total four DOF(Degrees of Freedom) where the finger mechanism is well designed for grasping typical objects stably in human's daily activities such as sphere and cylinder shaped objects. The restriction of possible motions and the limitation of grasping objects arising from the reduction of DOF can be overcome by reflecting a typical human finger's motion profile to the design procedure. As a result, the developed hand can imitate not only human hand's shape but also its motion in a compact and efficient manner. Also this novel robot hand can perform various human hand gestures naturally and grasp normal objects with both power and precision grasping capability.

Keywords : robot hand, grasping, finger motion, four-bar linkage

I. 서론

지난 수 십년 동안 사람의 손을 대신하여 일반적인 목적으로 사용될 수 있는 정교한 인간형 로봇손들이 연구되어 왔다. 인간형 로봇손을 구성하는데 있어서 많은 수의 자유도(degrees of freedom)는 손의 구조를 복잡하게 만들고, 제한된 공간에 많은 구동기와 동력 전달장치를 배치해야 하는 어려움을 가져오게 된다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 여러 기술들이 시도되어 왔다. 첫번째로 구동기들을 손 밖, 팔뚝에 설치하는 방법이 있다(Utah/M.I.T hand[1], Robonaut hand[2], shadow hand[3]). 이 종류들은 손의 구조가 간단하고 가벼우면서도 큰 출력을 낼 수 있다는 장점이 있는 반면 다른 로봇팔에 적용하기가 어렵다는 단점이 있다. 또한 손목의 구조가 복잡해지고 제한된 손목 관절의 운동범위를 가지게 되어 사용하는데 어려움이 있다[4]. 다른 방법으로 기존의 공압 실린더나 모터를 대신할 수 있는 작고 가볍고 출력이 큰 구동기를 개발하려는 시도가 있다. 최근에 초음파모터[5]와 형상기억합금[6]이 구동기로 사용된 예가 있고 그 결과 모든 구동기가 손 안에 배치되고도 20자유도가 넘는 로봇손이 개발되었다. 하지만 이러한 여유 자유도를 갖는 로봇손의 경우, 매니플레이션 문제가 복잡해지므로 신뢰성 있는 손 동작을 구현하기 위해서는 좀 더 시간이 필요하다고 여겨진다. 마지막으로 널리 사용되고 있는 방법은 자유도를 줄이는 것이다. 손가락의 마지막 마디(distal phalanx)와 중간 마디(middle phalanx)를 구속시키는 방법은 여러 손의 구조에서 사용되고 있는 일반적인 예가 될 수 있다(Robonaut hand[2], DLR II, Gifu Hand[8]). 그러나 이러한

간결한 설계는 손 동작에 있어서 정밀성과 유연성을 감소시키게 되고 물체를 쥐는데 있어서도 안정성을 저하시키는 결과를 초래하게 된다.

이족보행 휴머노이드 로봇을 위한 손을 설계할 때, 이러한 어려움들은 더욱 증가한다. 그 이유는 첫째로 보통 성인보다 작은 로봇의 전체 몸체와 균형을 맞추기 위하여 손의 크기와 무게는 극히 제한된다는 것이다. 1.2m의 ASIMO[9]나 1.25m의 HUBO[10], 1.3m의 MAHRU-R 등의 예를 보면 10세 미만의 어린이 정도의 키를 가지고 있는 것을 알 수 있는데 이들을 위한 손 또한 작아질 수 밖에 없다. 둘째는 이족보행로봇의 특징상 자유도가 매우 많게 되는데, 이로 인한 많은 수의 구동기를 작동시키기 위해 전기장치들 또한 로봇 안에 탑재되어야 한다는 것이다. 예를 들어 26자유도의 ASIMO, 41자유도의 HUBO, 그리고 34자유도의 MAHRU-R 등을 고려해 볼 때, 자유도의 수와 동일한 수의 모터들을 제어하기 위한 모터 드라이버, DSP(Digital Signal Processor), power system 등을 로봇 안의 제한된 공간에 설치해야 하는 어려움이 있다. 마지막으로, 인간과 로봇 사이에 손동작을 이용한 친숙한 소통을 가능하게 하기 위해서는 로봇손의 모양과 동작이 인간과 비슷하게 설계되어야 한다. 이와 같은 이유들 때문에 이족보행 로봇을 위한 로봇손의 설계는 매우 어렵게 되고 결과적으로 만족할만한 로봇손이 아직까지 개발되지 못했다.

실질적으로 이족보행 로봇의 손은 자유도를 크게 줄이도록 강요된다. 왜냐하면 위에서 설명한 바와 같이 많은 수의 자유도는 로봇에게 기계적 혹은 전기적 부담을 가할 뿐만 아니라 실시간 제어를 하는데 있어서도 연산량의 증가를 가져오기 때문이다. 불행하게도 현재의 로봇 기술은 이러한 요구들을 충족시키지 못하고 있으며 그 결과 로봇손의 자유도는 1자유도의 ASIMO, 5자유도의 HUBO 등의 예와 같이 크게 제한되어 설계되었다. 위에서 언급한 바와 같이 자유도가 감소하면 로봇손이 동작하는데 있어 정밀성과 유연성이 불충분하게 되고 사물을 파지하는데 있어서도 안정성을 보장받기 어렵게 된다. 이는 손가락이 움직일 수 있는 범위가 제한되고 손이 쥘 수 있는 사물의 종류가 감소함을 의미한다. 따

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 6. 11., 채택확정 : 2007. 12. 6.

안상익 : 한국항공대학교 항공우주기계공학부, 한국과학기술연구원 (flyingwith@hanmail.net)

오용환 : 한국과학기술연구원(oyh@kist.re.kr)

권상주 : 한국항공대학교 항공우주기계공학부(sjkwon@kau.ac.kr)

※ 본 연구는 정보통신부 선도기반기술개발사업인 “상호 협력하는 분산형 네트워크 기반 휴머노이드 기술개발”에 의해 지원되었음.

라서 불충분한 자유도를 갖는 로봇손은 특정 목적에 적합하도록 설계되어야 한다는 전제에 의거하여 휴머노이드 로봇이 쥘 수 있는 대상은 미리 선정되어야 하고 로봇손은 선택된 대상의 모양에 적합하게 설계되어야 한다. 여기서 감소된 자유도로 손가락의 동작을 생성하기 위해 손가락의 각 마디는 서로 구속되어 움직이게 되는데, 결국 각 마디간의 구속관계가 로봇손이 쥘 수 있는 대상의 종류와 쥘의 안정성, 손 동작의 자연스러움 등을 결정하게 된다. 하지만 기존의 휴머노이드 로봇손에 있어서는 이러한 부분을 고려하는 것이 부족하였다. 따라서 본 논문은 휴머노이드 로봇손을 설계하는데 있어서 구형 및 실린더형 물체를 안정적으로 쥐기 위한 손가락 마디간의 구속관계를 고려하였고 이를 위하여 인간 손가락 구조에 있는 특징을 로봇 손가락에 반영하였다. 이 점이 기존의 휴머노이드 로봇손 설계와 차별화되는 부분이라고 말할 수 있겠다.

이 논문의 목적은 안정적인 쥘을 고려한 1자유도의 로봇 손가락을 설계하고, 손동작을 통한 인간과의 의사소통을 위해 3개의 손가락과 1개의 엄지를 갖는 로봇손을 구성하는데 있다. 이를 위해 인간손의 구조와 동작을 고찰하였고 4절링크를 이용하여 로봇손의 동작을 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 설계개념에 대하여 설명하고 3절에서는 4절 링크를 기구학적으로 해석한 후 링크를 이용한 손가락의 구조에 대하여 살펴본다. 4절에서는 완성된 로봇손으로 가능한 파지동작들을 설명하고 5절에서는 로봇손 구동을 위한 제어시스템 및 실험결과들을 제시한다. 마지막으로 6절에서 논문의 결론을 맺는다.

II. 설계 개념

1. 목적 대상물

인간들이 일상생활에서 손을 사용하여 다루는 많은 대상들은 원통, 구, 육면체, 평판, 막대, 삼각뿔 등의 특정 모델들로 간략화되고 분류 되어질 수 있다. 대상들의 모양과 크기에 따라 쥘의 방식 혹은 알고리즘은 달라지게 된다[11]. 특정한 목적에 특화된 로봇손을 설계하고자 할 때 목적하는 대상물들은 미리 결정되어야 하며 그 대상물들이 주요하고 일반적인 모양이어야 하는 것은 당연하다. 또한 로봇이 수행하게 될 작업들도 미리 고려되어야 한다.

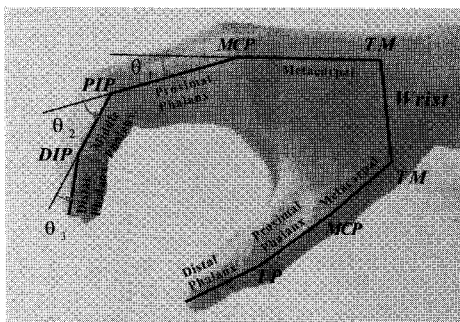


그림 1. 사람 손의 기하 - $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각각 MCP, PIP 및 DIP 조인트의 회전각이다.

Fig. 1. Geometry of a human hand - θ_1, θ_2 , and θ_3 are the joints of MCP, PIP, and DIP respectively.

최종적으로, 움켜쥐는 동작(power grasping)을 위해서는 원통과 구가 선택되었고 손가락 끝을 이용한 정밀한 파지(precision grasping)를 위해서는 작은 육각 블록들이 결정되었다. 이러한 모양의 대상들을 가지고 로봇은 다양한 작업들을 수행 할 수 있다. 예를 들면 병이나 컵과 같은 원통형 대상물들을 가지고 인간을 시중을 들 수 있고, 구형의 물체들로 공을 던지거나 받는 놀이를 할 수 있으며, 작은 블록들로 장기를 들 수 있다.

2. 인간 손가락의 운동

그림 1에 표시된 인간 손가락의 운동 범위는 손의 해부학적 결과에 의하여 제한된다. 이 정적 구속(static constraint)은 보통 다음 부등식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \theta_{MCP_F} &\leq 90^\circ \\ 0^\circ \leq \theta_{PIP_F} &\leq 110^\circ \\ 0^\circ \leq \theta_{DIP_F} &\leq 90^\circ \\ -15^\circ \leq \theta_{MCP_AA} &\leq 15^\circ \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 하첨자 'F'는 관절의 굴곡(flexion)을 'AA'는 외전(abduction)/내전(adduction)을 의미한다[12]. 또한 손가락의 동작은 운동 중에도 구속을 받는데 이를 동적 구속(dynamic constraint)이라 부른다. 그 중 하나를 살펴보면 DIP(Distal Interphalangeal) 관절을 구부리기 위해서는 외력이 작용하지 않는 한 그에 해당하는 PIP(Proximal Pnterphalangeal) 관절 또한 따라서 구부러지게 된다. 이 DIP와 PIP 관절 사이의 관계는 대략 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$\theta_{DIP_F} = \frac{2}{3} \theta_{PIP_F} \tag{2}$$

이러한 관계들로부터 몇 가지 중요한 내용들을 추론해 볼 수 있다. 첫번째로 (1)로부터 손가락의 두번째 관절인 PIP의 운동범위가 첫번째 관절인 MCP (metacarpophalangeal) 의 운동범위보다 더 크다는 사실에 주목할 수 있다. 손이 최대로 편위에서 주먹을 쥘 위치까지 움직일 때 손바닥은 공간을 형성하게 된다. 만약 구나 원통이 그 공간 안에 놓여 최대로 확장되면 손바닥과의 사이에 접촉점들이 발생한다. 이 접촉점들의 위치는 대상을 움켜쥐는 동작에 있어서 안정성에 영향을 끼친다. 안정적인 파지를 위해서는 접촉점들이 손으로부터 구나 원통의 바깥쪽에 위치하는 것이 바람직한데 그 이유는 접촉점에서 발생하는 접촉력들의 방향이 손바닥을 향하게 되어 손과 물체 사이의 구속을 견고히 하기 때문이다. PIP 관절이 많이 구부러질 때 접촉점들은 바깥쪽에 위치하게 되고 결과적으로 더욱 안정적인 쥘을 가능하게 해준다.

그림 2는 인간 손이 특정한 동작을 할 때 손 안에 놓여질 수 있는 구와 그에 상응하는 접촉점들의 위치를 보여주고 있고 그림 3은 두번째 마디의 각 위치에 따른 접촉점들의 변화를 표시해주고 있다. (1)로 모델링 되는 인간 손가락의 해부학적 특징을 로봇 손가락의 동작에 반영하기 위하여 로봇 손가락 각 마디간의 구속관계 즉 각 관절의 회전 각도를 인간 손가락의 동작 범위에 맞추어서 설계할 수 있다.

두번째로 PIP 관절과 DIP 관절 사이의 동적 구속에 대하여 살펴본다. 이 구속조건에서 중요하게 보이는 관계는 DIP 관

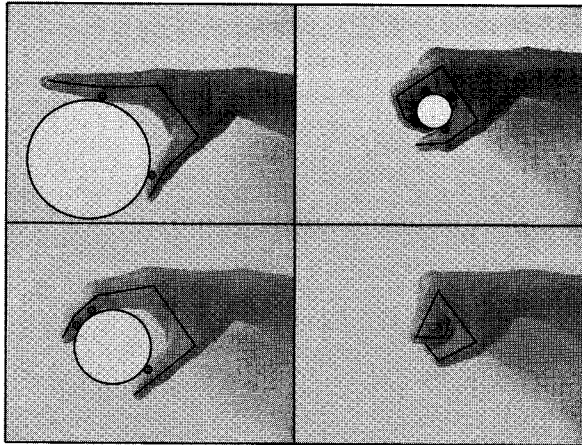


그림 2. 최대로 편 상태에서 주먹을 쥐기까지 사람 손의 동작.
Fig. 2. Typical human hand motion from open to closed position (fist).

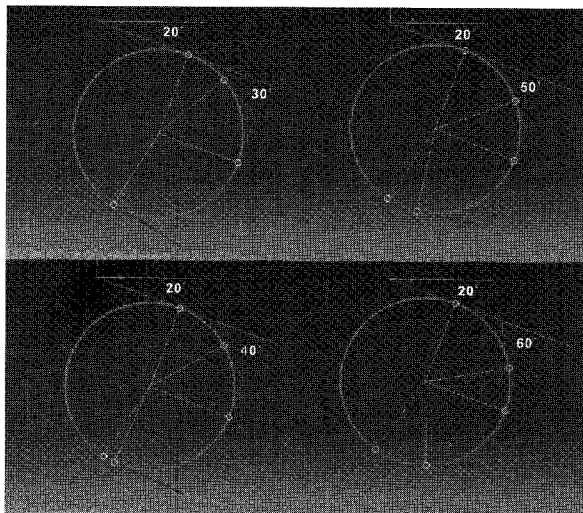


그림 3. 고정된 θ_1 에서 θ_2 의 변화에 따른 접촉점 이동.
Fig. 3. Movement of contact points according to the value of θ_2 .

절의 회전각이 PIP 관절의 회전각보다 더 작다는 사실이다. 만약 DIP 관절이 과도하게 회전하도록 두 마디가 구속되면 손가락의 중간 마디(middle phalanx)는 대상물과 접촉하지 못하게 된다. 목적 대상물의 크기와 모양에 따라 파지의 접촉 조건은 변화되기 때문에 두 관절 사이의 관계식은 유일하게 결정되지 않는다.

3. 설계 개념

손가락 하나가 1자유도를 갖도록 설계하기 위해서 손가락의 횡운동(abduction/adduction)은 무시되었고 중간과 끝 마디는 첫째마디(proximal phalanx)와 구속되었다. 기어, 텐던, 그리고 링크 등의 다양한 기계요소들이 검토되고 실험된 후에 손가락 마디 사이의 구속조건을 생성하기 위해 4절링크를 사용하기로 결정하였다. 링크는 간단한 구조를 가지면서도 안정적인 성능을 내고 기어에서 발생하는 백래시나 텐던에서의 늘어짐과 같은 문제점이 없는 장점을 가지는 반면 비선형적인 동작을 하고 동작 위치에 따라 전달되는 토크가 변화한다는 단점을 가지고 있다. 하지만 동작의 비선형성이나 토크

표 1. 손가락 각 마디의 운동 범위 설정.

Table 1. Designed movable ranges of phalanges.

손가락	MCP	DIP/IP(엄지)	PIP
인지/약지	0~75°	0~95°	0~90°
중지	0~75°	0~95°	0~90°
엄지	0~60°	0~80°	

의 변화는 기구학적 해석을 통해 예측될 수 있다. 각 손가락 마디의 운동범위는 안정성을 증대시키기 위해 위에서 설명된 해부학적 고찰 결과들을 고려하여 결정되었고 표 1에 나타내었다. 마지막으로 각 손가락의 MCP 관절은 손바닥에 고정된다고 가정하였다.

III. 링크 구조의 해석

1. 4절 링크

그림 4는 손가락 첫번째 마디의 구조에 사용된 4절링크를 보여주고 있다. 링크 0은 손의 프레임에 부착되고 링크 1은 구동기에 연결된다. 손가락의 다음 마디는 링크 3을 통해 첫번째 마디와 구속되어 있다. 점 A에 중심을 두고 있는 원은 링크 1에 고정되어 있는 타이밍 폴리리를 나타낸다. 여기서 링크 1은 첫번째 마디의 프레임을 의미하고 링크 2는 프레임 안에서 운동하는 막대를 나타낸다. 그리고 링크 5는 두번째 손가락 마디를 의미한다. 이 구조에서 결정되어야 할 파라미터들은 링크 2의 길이 l_2 와 링크 0가 x_1 축과 이루는 각 γ_1 이 된다. l_0 와 l_3 는 베어링이나 폴리리 등과 같은 기계요소들의 크기에 의해 결정되고 l_1 은 손가락 첫째 마디의 길이가 된다. 한편 각 손가락 마디의 길이는 인간 손가락 마디의 길이에 근거하여 결정되었다. 실지로 연구실의 동료 연구원들의 평균값을 바탕으로 선택되었고 표 2에 나타내었다.

이제 결정되어야 할 두 파라미터 l_2 와 γ_1 의 값이 4절링크의 동작에 미치는 영향을 살펴보자. 구동기의 작동에 의해 링크 1이 설정된 운동범위(0~75°)를 회전하는 상태를 가정한다. 모든 파라미터들이 고정되어 있는 상태에서 각 링크는 기구학적 관계에 의해 운동을 하게 된다. 만약 파라미터들 중 한 값을 변화시킨 후 같은 운동을 시키면 링크 2와 링크

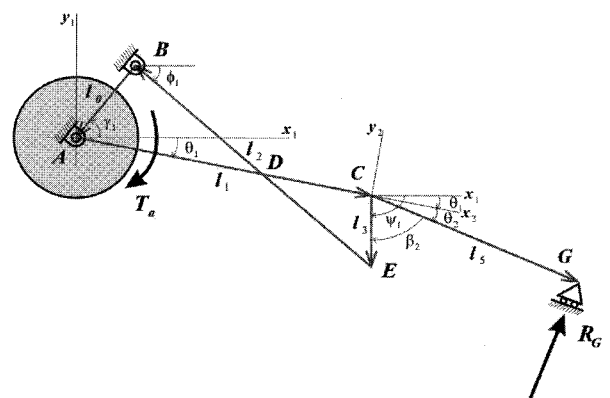


그림 4. 정적 반력이 작용하고 있는 4절링크($l_0 \sim l_3$)의 기하학적 구조.

Fig. 4. Geometry of a four-bar-linkage with static reaction.

표 2. 각 손가락 마디의 길이(단위 : mm).

Table 2. Length of each phalanx.

손가락	첫번째 마디	두번째 마디	세번째 마디
인지/약지	36	20	18
중지	40	24	20
엄지	40		32

3는 이전과 다른 궤적을 따라 운동하게 된다. 여기서 우리의 관심은 다음 손가락 마디와 결합되어 있는 링크 3의 운동이 설계개념에서 정한 운동범위(0~95°)를 만족시키게 하는 것이다. 한가지 더 고려되어야 하는 점은 파라미터의 크기가 변화할 때 다음 마디로 전달되는 토크의 값 또한 변화한다는 사실이다. 따라서 두 파라미터의 값을 결정하는데 있어서 고려되어야 할 사항은 각 마디의 운동범위와 전달되는 토크의 크기가 된다. 결국 설계개념에서 결정된 요구 운동범위를 충족시키면서 전달되는 토크는 최대값을 갖도록 파라미터를 결정해야 한다. 추가로 각 요소들간의 간섭 또한 고려되어야 한다.

한편, 기구학적 관계로부터 링크 2와 3의 위치는 독립변수인 θ_1 에 대한 함수로 나타내어진다. 만약 다음 손가락 마디인 링크 5의 상대적 위치를 θ_2 로 나타낸다면 두 마디 관절 각 사이의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta_2 = \psi_1 - \beta_2 - \theta_1 \tag{3}$$

그리고 그림4에서 링크2와 링크3의 절대 위치를 나타내는 ϕ_1 과 ψ_1 각은 다음 식으로 결정된다.

$$\psi_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2^2 - C_3^2}}{C_2 + C_3} \tag{4}$$

$$\phi_1(\theta_1) = 2 \tan^{-1} \frac{D_1 + \sqrt{D_1^2 + D_2^2 - D_3^2}}{D_2 + D_3} \tag{5}$$

$$\begin{cases} C_1 = 2l_1l_3 \sin \theta_1 + 2l_0l_3 \sin \gamma_1 \\ C_2 = 2l_1l_3 \cos \theta_1 - 2l_0l_3 \cos \gamma_1 \\ C_3 = l_2^2 - l_0^2 - l_1^2 - l_3^2 + 2l_0l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} D_1 = 2l_1l_2 \sin \theta_1 + 2l_0l_2 \sin \gamma_1 \\ D_2 = 2l_1l_2 \cos \theta_1 - 2l_0l_2 \cos \gamma_1 \\ D_3 = -l_3^2 + l_0^2 + l_1^2 + l_2^2 - 2l_0l_1 \cos(\theta_1 + \gamma_1) \end{cases} \tag{7}$$

(3)에서 β_2 는 초기 위치에서 각 손가락 마디를 직선상에 놓이도록 하기 위한 상수가 되고 파라미터의 변화에 따라 다르게 설정되어야 한다. 위의 관계식들에 의해 표1의 운동 범위를 만족시키는 두 파라미터(l_2, γ_1)의 쌍은 무수히 많이 존재한다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음 손가락 마디로 전달되는 토크의 값을 최대로 만드는 값을 찾아야 한다.

2. 설계 파라미터 결정

그림 4는 구동기에 의해 링크 1에 토크가 가해지고 있고 링크 5의 끝 즉 손가락 둘째 마디의 끝에서 반력이 발생하고 있는 한 예를 보여주고 있다. 토크 T_a 가 일정하고 링크 1(첫째마디)의 회전각 θ_1 이 한 지점에 고정되도록 지지점 G에서

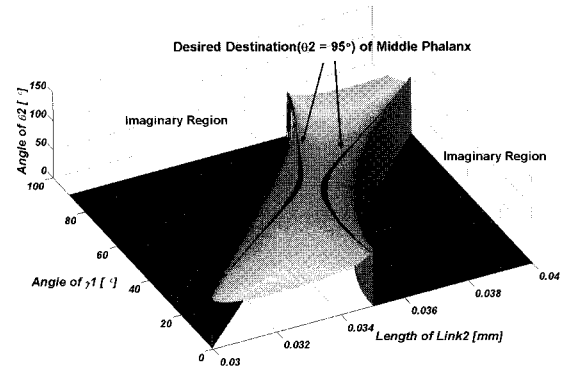


그림 5. 링크1(첫째마디)의 최종 위치 $\theta_1 = 75^\circ$ 에서 링크5(둘째마디)의 회전각 θ_2 의 변화.

Fig. 5. Variation of θ_2 at the final position ($\theta_1 = 75^\circ$).

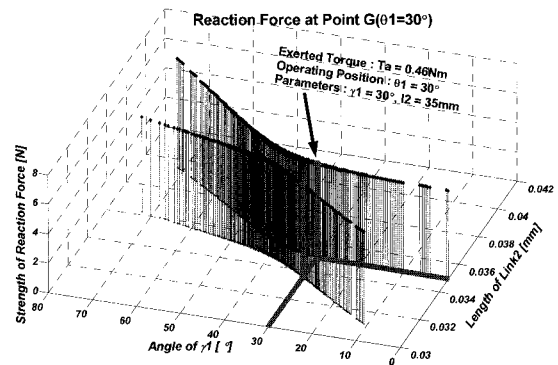


그림 6. 설계 파라미터 분포에 따른 G점에서의 반력($\theta_1 = 30^\circ$).

Fig. 6. Reaction force at point G ($\theta_1 = 30^\circ$ case).

반력이 발생하고 있을 때, 링크 5(둘째마디)의 회전각 θ_2 와 반력 R_G 의 크기는 두 파라미터 l_2 와 γ_1 의 값에 따라 변화하게 된다. 이때 링크 5(둘째마디)에 전달되는 토크는 G점에서의 반력과 링크 5의 길이를 곱하여 계산할 수 있는데 정적 반력 R_G 는 다음 식으로 표현된다.

$$R_G = \frac{T_a}{l_1 \cos \theta_2 + \frac{l_1 l_2 \sin(\theta_1 - \phi_1)}{l_0 \sin(\phi_1 + \gamma_1) + l_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)}} \tag{8}$$

두 파라미터의 값을 찾고 그 효과를 시험하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 우선 링크 1의 위치 θ_1 을 최대값(75°)에 고정 시킨 후 두 파라미터의 값을 변화시키면서 링크 5의 상대 위치 θ_2 의 변화를 3차원 상에 곡면으로 나타내었다. 그 후 θ_2 가 의도된 목적지(95°)에 가도록 하는 파라미터의 쌍들을 표시하였다. 그림 5에서 위의 곡면은 θ_1 이 최대값 75°일 때 두 파라미터(l_2, γ_1) 값의 변화에 따른 θ_2 의 변동을 의미하고 아래의 어두운 평면들은 허수값이 나오는 파라미터의 쌍들로 이 값들은 사용될 수 없음을 의미한다.

파라미터의 후보 값들은 θ_2 가 95°에서 1°의 오차를 가지는 범위 안에서 선택되었고 윗면에 짙은 선들로 표시되었다.

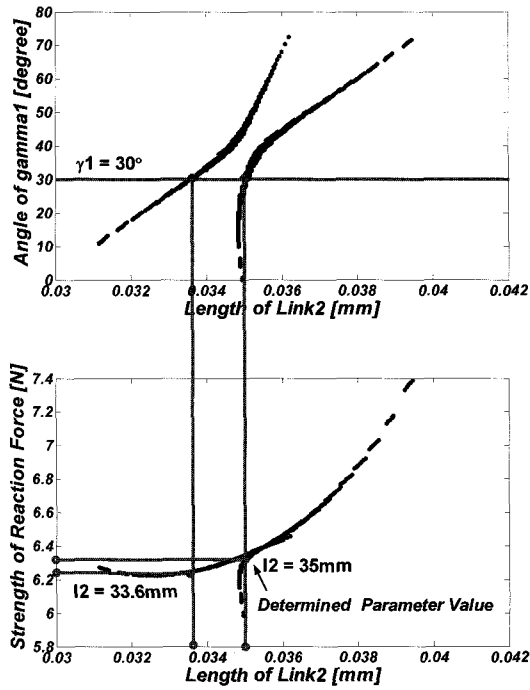


그림 7. 각 평면에 투영된 G점에서의 반력.
Fig. 7. Reaction force at point G is reflected in each plane.

표 3. 집게손가락의 파라미터 값들.

Table 3. Parameters of index finger.

링크 길이[mm]		각	
l_0	6	γ_1	30°
l_1	36	γ_2	43°
l_2	35	β_2	44°
l_3	5	β_3	46.5°
l_4	5	결정된 운동 범위	
l_5	20	첫째 마디	$0\sim 75^\circ$
l_6	21	둘째 마디	$0\sim 94.6^\circ$
l_7	5	셋째 마디	$0\sim 92.5^\circ$
l_8	18		

이 후보값들 중에서 γ_1 이 30° 보다 큰 값들은 타이밍 폴리머와 링크2 사이에 간섭을 발생시키기 때문에 제외되고 나머지 값들만이 후보로 남게 된다. 그림 6은 θ_1 이 특정한 위치 30° 에 있을 때 파라미터 값들의 변화에 따른 반력의 크기를 3차원적으로 보여주고, 그림 7은 그림 5의 그래프를 2차원 평면 상에 투영하여 나타내고 있다. 이 그래프로부터 γ_1 의 값이 클수록 전달되는 토크의 크기 또한 커진다는 사실을 알 수 있고 당연히 사용 가능한 가장 큰 값 $\gamma_1=30^\circ$ 를 선택하였다. γ_1 의 값이 확정되면 링크 2의 길이에 따라 두 후보만이 남게 된다. 최종적으로 모든 요구사항을 만족하는 최선의 선택을 할 수 있다. 위와 같은 과정들은 다음 손가락 마디에서의 미지의 파라미터들을 찾아내기 위해서 다시 반복된다.

3. 손가락 구조

그림 8은 손가락 하나에 대한 전체적인 구조를 보여주고 있다. 첫째마디와 둘째마디는 각각 4절링크로 구성되어 있고 셋째마디는 둘째마디의 링크 7에 연결된 하나의 링크로 이루어져 있다. MCP, PIP 그리고 DIP 관절의 상대적 회전각들을 각각 θ_1 , θ_2 그리고 θ_3 로 표시할 때 θ_2 와 θ_3 는 독립변수 θ_1 에 대한 함수들로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_{MCP_F} \\ \theta_2 = \theta_{PIP_F} = \psi_1 - \beta_2 - \theta_1 \\ \theta_3 = \theta_{DIP_F} = \psi_2 - \beta_3 - \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

위 식에서 각 ψ 값들은 (4)와 (6)에 의해 결정되고 β 값들은 모든 마디들이 초기 위치에 놓이도록 선택된다. 손가락들 중 인지에 대해 결정된 파라미터 값들이 표 3에 예시되어 있다.

IV. 상세 설계

그림 8과 9는 개발된 손가락과 로봇손의 디자인이다. 표 4에 명시된 구체적인 스펙들을 살펴볼 때 성인의 손보다 더 작고 가볍다는 것을 알 수 있다. 대부분의 부품은 알루미늄 합금 AL7075로 제작되었고 손가락 끝은 마찰력을 증가시키기 위하여 실리콘으로 제작되었다. 구동기로는 Faulhaber사의

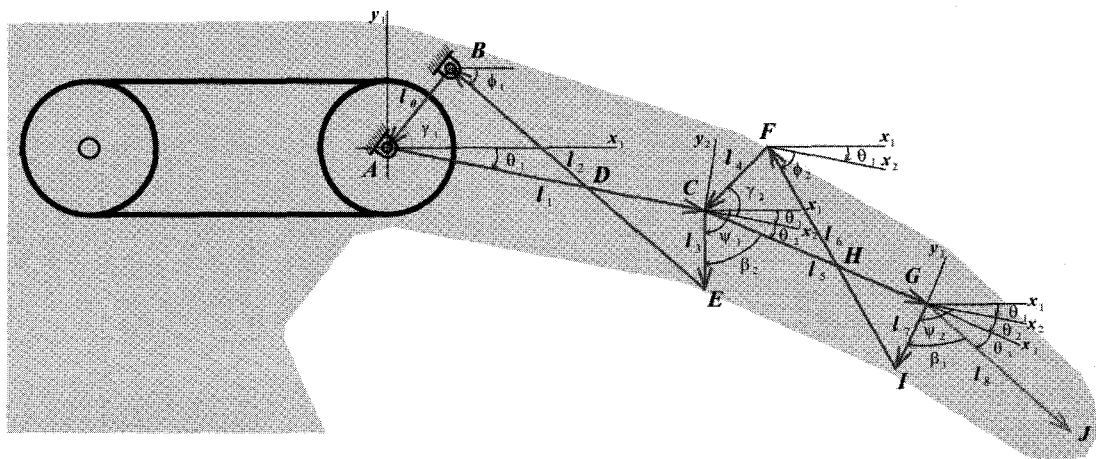


그림 8. 로봇 손가락의 내부구조.
Fig. 8. Internal structure of a finger.

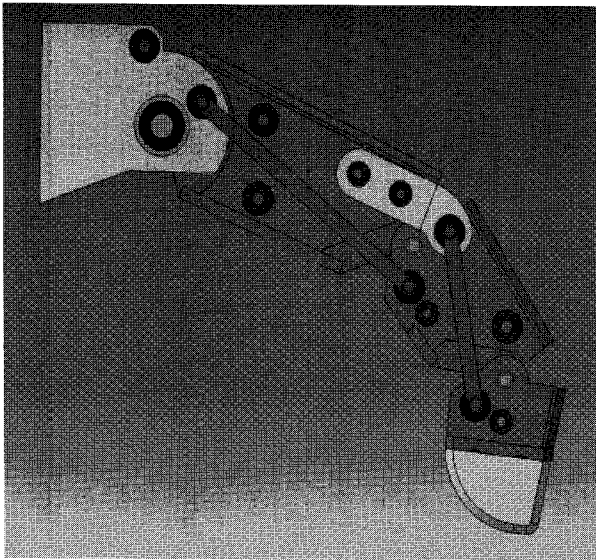


그림 9. 개발된 손가락의 디자인.
Fig. 9. Design of the developed finger.

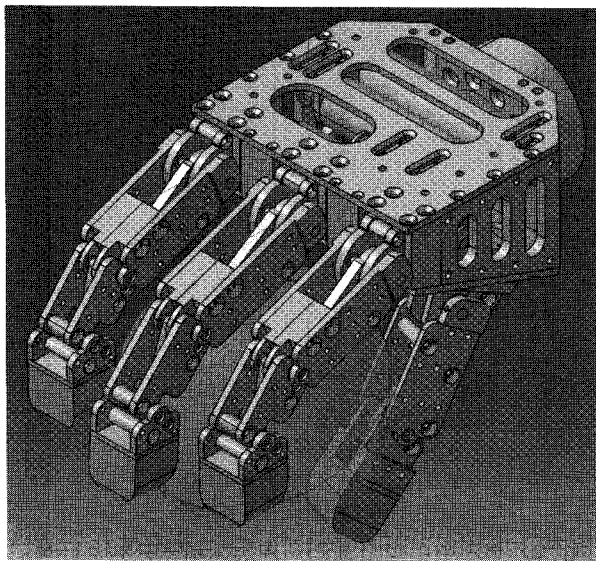


그림 10. 개발된 로봇손의 디자인.
Fig. 10. Design of the developed hand.

표 4. 개발된 로봇손의 세부 스펙.

Table 4. Specifications of the developed robot hand.

길이(FT 센서 제외)	160mm
폭	76mm
높이(엄지 제외)	46mm
무게(FT 센서 제외)	380g
손가락 수	4(인지, 중지, 약지, 엄지)
모터	Faulhaber DC-1717T(152:1)
	Faulhaber DC-1319T(134:1)
동력전달	Timing Belt
재료	AL7075, 실리콘(손 끝)
F/T 센서(손목)	ATI Mini40 Transducer

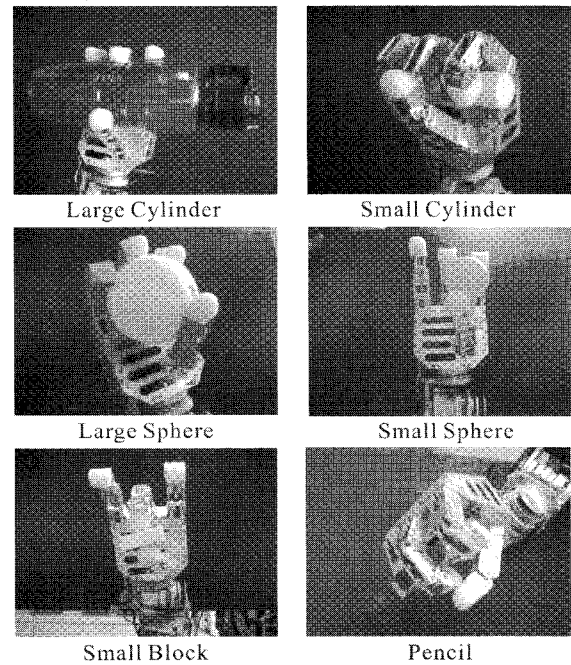


그림 11. 다양한 파지 동작들.
Fig. 11. Various grasping postures.

두 종류 모터가 사용되었는데 DC-1717T 모터는 엄지에, DC-1319T 모터는 다른 손가락들에 적용되었다. 기어 비는 백드라이버빌리티를 고려하여 152:1과 134:1로 결정되었다. 로봇손과 손목과의 연결부분에는 F/T 센서가 삽입되었는데 이는 로봇손에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하여 다양한 작업을 수행하는데 사용하기 위해서이다. 예를 들어 칠판에 글을 쓰는 작업을 수행하기 위해서는 표면으로부터 전달되는 힘의 크기를 측정할 필요가 있다.

그림 11은 설계개념에서 의도되었던 다양한 파지 동작들을 보여준다. 그림에서 나타난 대로 자연스럽게 안정적인 쥘 동작들이 구현되었으며, 이것은 인간 손가락의 움직임에 대한 해부학적 데이터와 기구학적 분석에 근거한 설계가 로봇손을 제작하는데 있어서 효과적이라는 사실을 입증한다. 한편 손가락 끝을 이용한 정밀한 파지(precision grasping)를 위해 엄지의 위치가 집게 손가락이 아닌 가운데 손가락과 만나도록 손바닥 안쪽으로 기울어져 부착되었다. 그 이유는 손바닥 전체를 이용한 움켜잡는 동작(power grasping)을 취할 때 접촉점들이 손바닥의 중앙에 있는 것이 더 안정적이기 때문이다.

V. 구현 및 실험

개발된 로봇손에 대한 제어 시스템을 구성하는데 있어서 휴머노이드 로봇 전체와의 통일성을 위해 IEEE-1394에 기반한 실시간 로봇제어시스템이 사용되었다[13]. 휴머노이드 주 제어기(main controller)는 리눅스 기반의 RTOS Xenomai에서 작동되고 IEEE-1394 통신망을 이용하여 각 조인트 제어를 위한 부제어기(local controller)와 정보를 주고 받는다. 각 손가락 동작을 위한 기준궤적(위치와 속도)은 주제어기에서 5차 다항식을 이용하여 생성되어 부제어기로 전달된다. 부제어기인 DSP 하나는 네 개의 모터를 동시에 제어할 수 있고 PID제어기가 내부에 구현되어 있다. 계산된 PWM의 펄스폭은 모터

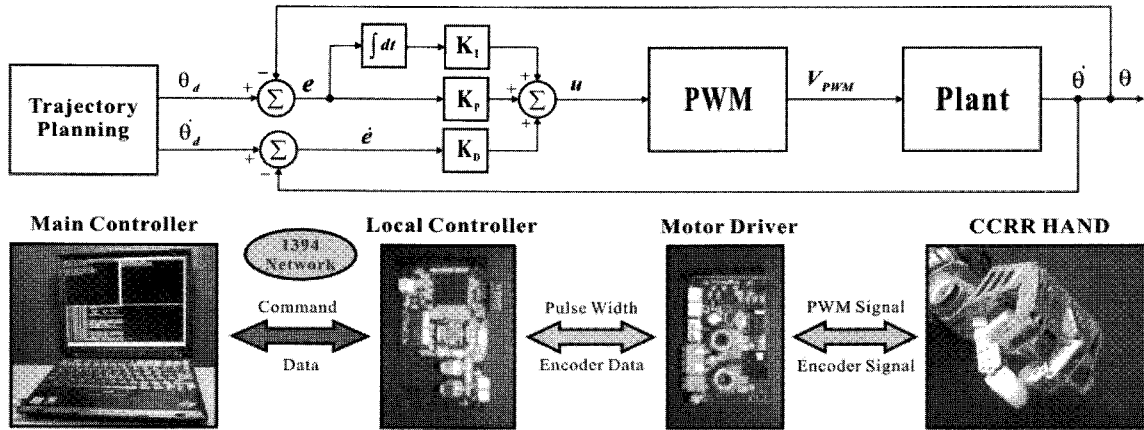


그림 12. 로봇손 제어시스템과 블록 다이어그램.
Fig. 12. Control system and block diagram for the robot hand.

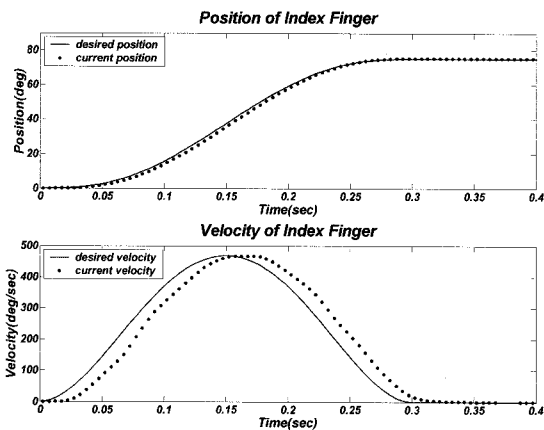


그림 13. 인지의 운동 (0~75°).
Fig. 13. Controlled motion of index finger (0~75°).

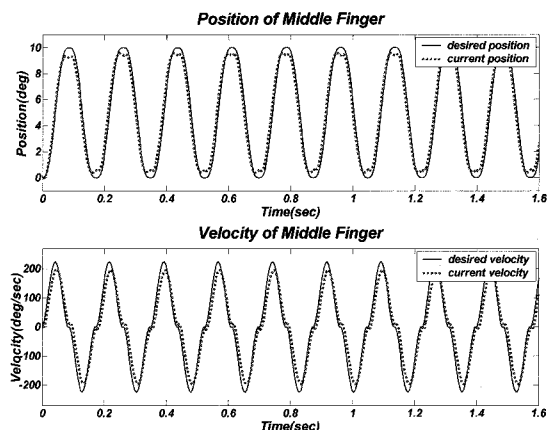


그림 14. 중지의 주파수 응답(0~10°).
Fig. 14. Frequency response of middle finger (0~10°).

드라이버로 전달되어 PWM 신호로 변환되고 엔코더 신호는 모터 드라이버에서 읽어 들여 DSP로 전달된다. 로봇손을 위한 제어시스템과 블록 다이어그램이 그림 12에 나타나있다.

손가락의 성능을 시험하기 위해 두 가지 실험이 실시되었다. 첫 번째 실험에서는 손가락을 초기 위치에서 최종 위치까지 구부리는데 걸리는 최소 시간을 측정하였는데 각 손가락마다 다른 반응 속도를 보였다. 엄지와 인지는 0.3초가 소요되었고 중지와 약지는 0.5초가 걸렸다. 인지에 대한 실험 결과가 그림 13에 나타나 있다. 실험에서 측정된 손가락의 속도는 사람의 손가락이 움직일 수 있는 최대 속도와 비슷한 값을 보인다. 두 번째 실험에서는 주파수 응답을 측정하였다.

각 손가락은 0°~10°의 범위에서 움직이게 하였다. 실험 결과 로봇 손가락이 안정적으로 따라갈 수 있는 가장 높은 주파수는 6Hz로서 이는 로봇 손가락들이 아주 민첩하게 반응할 수 있다는 것을 보여준다. 그림 14는 중지에 대한 주파수 응답 실험 결과이다.

첫째 실험 결과에서 인지와 약지의 구조가 동일함에도 불구하고 초기위치에서 최종위치까지 안정적으로 구부리는데 걸리는 최소시간이 서로 다르게 측정되었다. 이 결과는 구동기와 손가락을 연결하는 타이밍 벨트의 길이 차이에서 오는 탄성계수의 불일치에 기인한다. 인지에 쓰인 타이밍 벨트의

잇수(number of teeth)는 40개이고 약지의 경우는 54개이다. 일반적으로 길쭉한 재료의 탄성은 길이에 반비례하고 단면적에 비례하게 된다. 손가락이 동작할 때 타이밍 벨트는 인장되면서 기계 에너지를 축적하게 되고 모터에 외력으로써 작용하게 된다. 이때 탄성의 차이에 따라 외력의 작용이 달라지게 되는데 탄성이 작은 벨트를 사용할 경우 탄성이 큰 벨트를 사용할 때 보다 외력의 작용시간이 지연되게 된다. 그 결과 모터가 낼 수 있는 성능이 한계에 도달했을 때, 모터가 순간적으로 역회전을 하도록 유도하게 되고 결과적으로 손가락의 동작이 끊기는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 보완하기 위해 단면적이 넓은 타이밍 벨트를 사용하여 탄성을 증가시켰다. 한편 파지 실험에 대한 동영상은 [14]에서 참조할 수 있다.

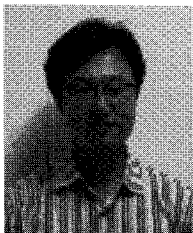
VI. 결론

이 논문은 휴머노이드 로봇을 위한 인간형 로봇손의 개발과 인간 손가락 동작을 모방한 설계 방법을 제시하였다. 손가락의 자유도를 줄이는 데서 발생하는 여러 문제점들을 극복하기 위하여 인간손의 구조와 손가락의 동작을 해부학적 관점에서 분석하였고 그 결과 손가락 관절의 운동범위에 대한 구속 조건에서 발견된 안정성을 높이는 데에 기여하는 특

정을 설계개념에 반영되었다. 손가락의 구조에는 4절링크가 사용되었고 파라미터들을 결정하기 위하여 시뮬레이션을 통한 해석이 수행되었다. 마지막으로 개발된 손의 성능을 검증하기 위한 실험이 수행되었다. 결과적으로 본 논문에서 개발된 로봇손은 인간이 일상생활에서 사용하는 대표적인 모양의 물체들 중 구형과 실린더형의 물체들을 자연스럽게 안정적으로 파지할 수 있었다. 하지만 접시와 같은 원판형 물체를 다루는 데에는 안정성이 부족함을 알 수 있었고 쥘 수 있는 물체의 크기 또한 제한되었다. 이는 서두에서 밝힌 바와 같이 자유도를 줄여 로봇손을 개발할 때에는 특정 형상의 물체들에 적합하게 설계되어야 한다는 전제를 확인해주고 있다. 그러나 인간이 일상생활에서 사용하는 많은 대상들이 구나 실린더의 형태를 가지고 있기 때문에 앞으로 개발된 로봇손을 응용할 수 있는 부분은 많이 있다고 말할 수 있다.

참고문헌

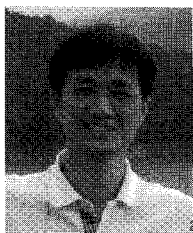
- [1] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. F. Knutti, R. T. Johnson and K. B. Biggers: Design of the Utah/M.I.T. Dexterous Hand, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1520-1532, 1986.
- [2] I. Yamano and T. Maeno: Development of a Robot Finger for Five-fingered Hand using Ultrasonic Motors, *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2648-2653, 2003.
- [3] C. S. Lovchic, M. A. Diftler: The Robonaut Hand : A Dexterous Robot Hand for Space, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 907-912, 1999 <http://www.shadow.org.uk/products/newhand.shtml>.
- [4] I. Yamano and T. Maeno: Five-fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2684-2689, 2005.
- [5] T. Maeno and T. Hino: Miniature Five-fingered Robot Hand Driven by Shape Memory Alloy Actuators, *Proceedings of the 12th IASTED International Conference Robotics and Applications*, pp. 174-179, 2006.
- [6] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger: DLR-Hand II: Next Generation of a Dexterous Robot Hand, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 109-114, 2001.
- [7] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama: Dexterous Anthropomorphic Robot Hand With Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 3, pp. 296-303, 2002.
- [8] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, Nobuo Higaki, and Kikuo Fujimura: The intelligent ASIMO: System overview and integration, *Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 2478-2483, 2002.
- [8] I.-W. Park, J.-Y. Kim, J. H. Lee and J.-H. Oh: Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3(KAIST Humanoid Robot-3: HUBO), *Proceedings of 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 321-326, 2005.
- [9] M. R. Cutkosky: On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 3, pp. 269-279, 1989.
- [10] J. Lin, Ying Wu, and Thomas S. Huang, Modeling the Constraints of Human Hand Motion, in *Proc. Workshop on Human Motion*, pp. 121-126, 2000.
- [11] M. O. F. Sarker, C. H. Kim, S. H. Baek and B.-J. You: An IEEE-1394 Based Real-time Robot Control System for Efficient Controlling of Humanoids, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1416-1421, 2006.
- [12] <http://mercury.kau.ac.kr/sjkwon/image2007/20070716SangikAhnHand.wmv> (실험 동영상).



안 상 익

1975년 9월 17일생. 1994년~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부(전자공학 복수전공). 2006년 1월~2007년 12월 한국과학기술연구원(KIST) 인지로봇연구단 학생연구원. 관심분야는 로봇 핸드 설계 및 제어, 임베디드 시스템, 비주얼

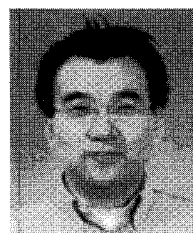
서보잉, 인공지능.



권 상 주

1966년 5월 29일생(음). 1989년 서울대학교 조선공학과 공학사. 1991년 포항공대 기계공학과 공학석사. 1991년~1997년 국방과학연구소(ADD) 연구원. 2002년 포항공대 기계공학과 공학박사. 2003년 한국과학기술연구원. 2004년 한국생산기술

연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 조교수. 관심분야는 초정밀로봇, 비행로봇, 휴머노이드, 강인제어 및 추정이론.



오 용 환

1991년 포항공과대학교 기계공학과 공학사. 1993년 동 대학원 기계공학과 공학석사. 1999년 동대학원 기계공학과 공학박사. 1999년~2000년 JSPS Post Doc. Fellow(일본 와세다대 Takanishi Lab). 2001~현재 한국과학기술연구원(KIST)

인지로봇연구센터 선임연구원. 관심분야는 인간형 로봇 플랫폼 및 메커니즘 디자인, 센서기반 강인 동적 보행, 로봇 매니플레이터의 컴플라이언스 제어, 시각 및 촉각 기반 로봇 매니플레이터의 제어.