

〈 논문 〉

유연한 인간형 로봇 손의 설계

지호준* · 이상헌* · 최병준* · 최혁렬†

(2005년 3월 25일 접수, 2006년 2월 24일 심사완료)

Design of a Dexterous Anthropomorphic Robot Hand

Hojune Chi, Sanghun Lee, Byungjune Choi and Hyouk-Ryeol Choi

Key Words: Anthropomorphic Hand(인간형 손), Thumb(엄지손가락), Robot Hand(로봇 손)

Abstract

According to the study of grasping of the human hand, it is noted that the metacarpal link of the thumb plays the key role in power grasping. Also the face of fingertip can be discriminated into five parts depending on the grasping modalities such as pinch grasp, fingertip grasp and power grasp. In this paper, the design of the anthropomorphic robot hand which has a thumb and three fingers is proposed. A difference of SKKU hand II from the previous gripperlike robot hand is that the metacarpal bone is connected between the thumb and the palm. This thumb mechanism is specially designed to get the degree of freedom which can realize flexible motions relative to objects. Based on the analysis, the hand mechanism is developed. Since the driving circuits for the hand are embedded in the hand, only the communication lines supporting CAN protocol with DC power cable are necessary as the input. A new robot is manufactured and feasibility of the hand is validated through preliminary experiments.

1. 연구 배경

로봇이 사람을 대신하여 유연한 작업 능력을 가지기 위해서는 인간과 비슷한 지능(intelligence), 이동성(mobility), 잡기(grasping) 등의 다양한 능력을 가져야 한다.

이중 인간형 로봇 핸드(Anthrobot hand)에 대한 수요와 연구가 매우 활발하다. 인간형 로봇 핸드 는 기존의 로봇 핸드와 달리 불특정 환경 및 도 구에 대한 적응이 쉽고, 비교적 강력한 파지와 정밀 조작이 동시에 가능하다. 또한 외형상 사람 으로 하여금 거부감이 적은 장점도 있다.

이러한 인간형 로봇 핸드의 개발에 있어서 가장 기본적인 과제는 인간의 자연스러운 운동을 재현 할 수 있는 메커니즘(mechanism)과 그 메 커니즘의 적절한 조합이다. 현재의 로봇 핸드는 단순한 집게(gripper)형태에서 발전하여 인간형 다 지 다관절 핸드로 개발되어 왔다. 하지만 여전히 기존의 집게 형태에서 크게 벗어나지 못하고, 단순히 손가락의 수가 늘어난 형태이다. 따라서 단순한 형태의 집기(grasping)는 안전하게 할 수 있으나 불특정 형태의 파지에 있어서 가장 중요한 안전성에 문제가 생긴다. 또한 손가락과 엄지손가락이 물체의 형상에 관계없이 항상 평행으로 대립하고 있고, 물체를 파지할 시 손바닥이 물체를 감싸 쥐는 인간의 손과 달리 고정된 형상이다. 따라서 파지에 있어서 중요한 손바닥의 역할이 미비하여 시스템의 효율적인 면에서 낭비가 심하다.^(4,5) 따라서 앞으로 효율적인 로봇 핸드 개발을 위해서는 인간의 손을 연구하여 얻어진 인체 운동의 특징 및 메커니즘을 분석하고 증명하여 로봇 핸드에 적극 반영하여야 한다.

* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

TEL : (031)290-7449 FAX : (031)290-7507

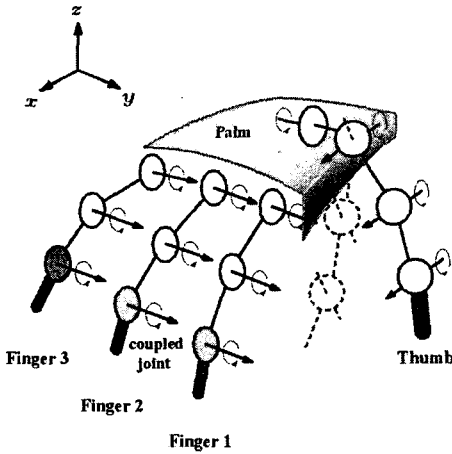


Fig. 1 Degree of freedom in robot hand

2. 인간 손의 움직임 고찰

인간의 손은 운동을 하는 골격과 이를 움직이게 하는 많은 근육들로 구성되어 있으며, 이러한 역학적 구조물은 근육의 조합으로 강한 파지나 섬세한 조작을 할 수 있다. 손가락은 Fig. 1과 같이 손가락 뼈사이 관절(distal interphalangeal joint)은 각각 1자유도의 pitch를 가지고, 손허리 손가락 관절(metacarpophalangeal)에서 yaw, pitch, roll의 3자유를 가져 총 손가락들은 5자유도를 가지게 된다. 실제 파지 시에 손가락 뼈사이 관절, 근위 손가락 뼈사이 관절과 손허리 손가락 관절의 pitch에서 큰 움직임과 주요한 역할을 하고, 손허리 손가락 관절의 나머지 yaw와 roll은 섬세한 조작운동이나 물체의 형상이 복잡한 경우 물체를 구속하기 위해서 약간의 움직임을 보인다. 특히 roll의 움직임은 아주 작고 섬세하여 일반 파지 시에는 거의 눈에 띄지 않는다. 인간의 손가락 움직임에서 마지막의 두 원위 손가락 뼈사이 관절과 근위 손가락 뼈 사이 관절은 외부 물체에 의하여 구속이 없는 상태에서 움직일 때 서로 일정한 비율을 유지하여 움직인다. 물체에 의하여 구속이 일어났을 때는 인간의 의지에 의하여 원위에서 조절할 수 있다.

인간 손의 동작에서 가장 두드러진 특징은 엄지손가락의 움직임이다. 손뼉의 기본 구조만 볼 때에는 원숭이와 별다른 차이점 없다. 하지만 인간의 엄지손가락은 손바닥 및 다른 손가락과 대립하는 구조로서 인간의 손이 다양한 물체를 안

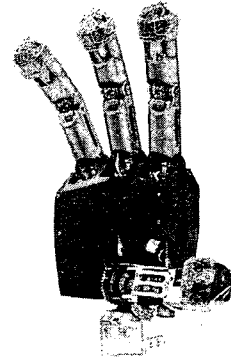


Fig. 2 SKKU Hand II

전하게 파지하면서도 섬세하게 조작할 수 있도록 한다. 엄지손가락의 움직임은 안장관절에 의한 기본적인 2자유도 움직임에 손가락과 마찬가지로 roll의 축을 가지고 있어서 물체의 형상에 따라 엄지손가락의 방향을 바꾸어가며 유연하게 움직인다. 엄지손가락과 손가락의 자유도에는 차이가 없으나, yaw의 역할이 미비한 손가락과는 달리 엄지손가락은 그 움직임이 크고 넓어 파지에 각 자유도가 매우 중요한 역할을 한다. 또한 엄지손가락의 손허리뼈는 움직임을 하면서 손바닥에 자유도를 주는 역할을 하며 물체의 형상에 맞게 손바닥의 모양을 변형시켜 흔히 말하는 손바닥 자유도를 형성한다.^(4,5,7)

3. 로봇 핸드 설계 개념

로봇 핸드의 효율적인 적용을 위해서 시스템의 모듈화가 필수적이다. 이러한 모듈화를 위해서는 비교적 간단한 구조와 작은 부피를 가지는 모터 직접 구동방식이 유리하다. 또한 모든 제어시스템이 로봇 핸드 자체에 장착되어 있어야 하며, 각각의 모듈들은 손쉽게 유지 보수가 이루어 질 수 있어야 한다.

SKKU Hand II는 모터 직접 구동 방식을 이용한 간결한 구조 및 제어기를 포함한 모든 부품을 로봇 핸드에 장착 하는 것을 목표로 설계되었다.

3.1 손가락 길이의 설정

로봇 핸드의 정밀 파지(fingertip grasp : 손가락 끝을 이용하여 물체를 집거나 바닥에 누워있는 납작한 물체를 집는 행동)를 안정하게하기 위해

서는 손가락 끝과 물체가 직각에 가까운 각도를 이루므로 마찰력을 크게 하여 안정성을 높인다. 또한 바닥에 놓인 물체를 집어 올릴 경우에도 물체표면의 법선 벡터와 손가락 끝의 각도가 클수록, 물체를 효과적으로 구속하여 안정된 파지를 할 수 있다. Fig. 3은 이러한 원리로 손가락의 링크 수에 따른 손가락 끝과 물체사이에 각이 마찰각과의 관계를 보여 주고 있다.

강력파지(power grasp : 손가락 표면을 사용하여 물체를 감싸 쥐는 행동)의 경우에는 손가락 표면을 사용하여 정밀파지 보다 큰 물체를 감싸 쥐는 파지를 한다. Fig. 4는 같은 크기의 물체를 다른 길이의 집게로 잡는 경우를 보여준다. 물체와 집게 상이의 접촉면에서 작용하는 마찰력은 동일하다고 할 때, 집게가 크면 집게 양 팔의 각도 B가 작아져서 집게 자체가 물체에 힘을 가하여 물체를 밀어내는 힘의 합력과 마찰력의 합력이 동일하게 되어 안정성을 유지 할 수 있다. 그러나 집게가 작게 되면 각도 B가 큰 값을 갖고, 물체를 구속하는 마찰력이 집게가 물체를 밀어내는 힘보다 작게 되어, 물체를 안정하게 구속하지 못한다.

인간형 손은 손가락의 링크와 마지막 링크가 작은 각도를 이루면서 큰 집게와 같은 효과를 낼 수 있다. 강력 파지는 엄지손가락과 손바닥이 많은 역할을 하지만, 이에 대응하는 손가락 차원에서의 안정성 또한 필요하다. 특히 가늘고 긴 물체를 쥐는 경우에 손가락이 큰 집게와 같은 효과를 내며 물체를 안정하게 구속시킨다.

이러한 인간형 로봇 손의 강력 파지와 정밀 파지에 대한 지표 Fig. 5의 각도 A, B를 사용한다. 여기서 각도 A는 손가락 끝과 물체가 이루는 각으로, 손가락 끝이 물체에 접근하여 접촉하는 방향이 마찰 원추(friction cone)안에 들어오기 위해 물체 표면의 법선 벡터와 이루는 각이 물체 표면과 직각을 이룰수록 정밀파지가 최적화 되는 지표로 정한다.

$$Y^2 = \ell_1^2 + \ell_2^2 + \ell_3^2 + 2\ell_1\ell_2\cos\phi + 2\ell_2\ell_3\cos 0.7\phi + 2\ell_1\ell_3\cos 1.7\phi \quad (1)$$

$$A = \cos^{-1} \left(\frac{\gamma_2 + \ell_3^2 - \ell_2^2 - \ell_1^2 - 2\ell_1\ell_3\cos\phi}{2\gamma\ell_3} \right) \quad (2)$$

$$B = \pi - 1.7\phi \quad (3)$$

B는 강력파지에 대한 지표로, 작을수록 큰 집게의 효과를 내어, 0°에 가까울수록 안정한 것으로 평가한다. 손가락 길이의 가장 이상적인 구성비는 γ 에 따라 링크의 길이 구성비를 변화 시키면서 A, B를 관찰한다.

손가락 전체길이는 일반 성인의 평균길이인 10cm로 가정 하였으며, 각각의 링크의 길이를 성능에 영향을 미치는 최소 단위인 1cm 단위로 변화시키며, 링크 조합에 지표의 값을 평가한다. 그 결과, ℓ_3 값이 1인 경우는 손가락 끝이 너무 짧아서 강력파지에 어려움이 있고, 5~8의 값을 가지는 경우는, A값이 너무 작아 비교대상에서 제외하였다. 따라서 ℓ_3 이 2~4인 경우를 비교하면, 손가락 끝 링크에 해당하는 ℓ_3 의 길이가 길어질수록 A가 작은 값을 가져서 정밀파지에 적당하지 않고, B값이 큰 값을 가져서 강력파지에 적당하지 않은 것으로 나타났다. 같은 ℓ_3 의 값을 가진 조합에서는 ℓ_2 의 값이 커지고 ℓ_1 이 작아질수록 A값과 B값이 모두 작아진다.

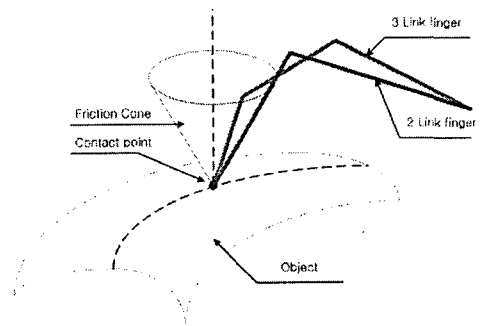


Fig. 3 Friction cone and fingertip grasp

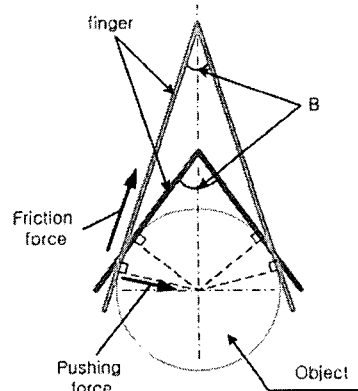


Fig. 4 Difference in Gripper size

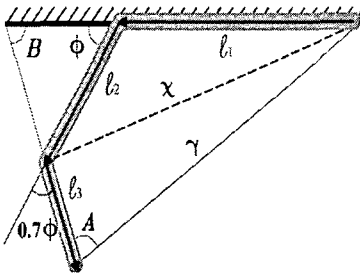


Fig. 5 Three link configuration

Table 1 Finger configuration

| 3링크 조합 $l_1-l_2-l_3$ | | |
|----------------------|-------|-------|
| 1-1-8 | 1-2-7 | 1-3-6 |
| 1-4-5 | 1-5-4 | 1-6-3 |
| 1-7-2 | 1-8-1 | 2-1-7 |
| 2-2-6 | 2-3-5 | 2-4-4 |
| 2-5-3 | 2-6-2 | 2-7-1 |
| 3-1-6 | 3-2-5 | 3-3-4 |
| 3-4-3 | 3-5-2 | 3-6-1 |
| 4-1-5 | 4-2-4 | 4-3-3 |
| 4-4-2 | 4-5-1 | 5-1-4 |
| 5-2-3 | 5-3-2 | 5-4-1 |
| 6-1-3 | 6-2-2 | 6-3-1 |
| 7-1-2 | 7-2-1 | 8-1-1 |

이를 정리해 보며, l_3 가 2인 경우가 3,4인 경우 보다 안정적이고, 나머지 링크인 l_2 의 값이 커지고 l_1 의 값이 작아질수록 정밀파지의 안정성은 떨어지나 강력파지의 안정성은 높아진다. 이러한 결과로, 2-2-6의 조합은 정밀파지가 안정하고, 2-6-2인 경우 강력파지가 안정하여, 이들의 두 파지를 모두 고려하여, 피보나치 수열의 비율인 2-3-5의 비를 손가락 마디 길이의 비로 하였다.

4. 로봇 핸드 설계

각각의 손가락과 손바닥을 모듈방식으로 설계하여, 조립 및 유지보수가 용이하도록 하였다. 손바닥 프레임에 로봇 핸드를 제어하기 위한 전원을 제외한 모든 컨트롤러를 내장 시키고, CAN 통신 규격을 이용하여 외부에서 제어가 가능하게 하였다.

4.1 자유도 설정

파지에 중점을 두어 물체의 조작에 사용되는

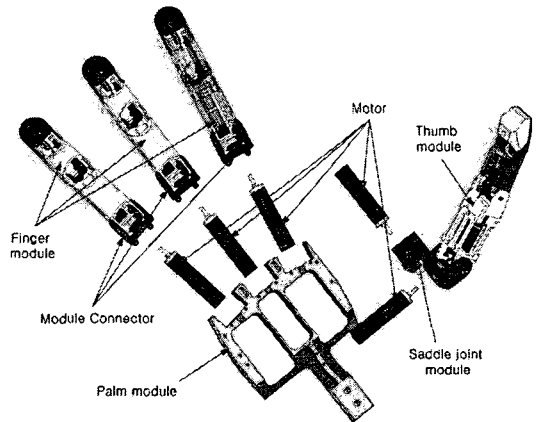


Fig. 6 Hand components



Fig. 7 Discriminated fingertip



Fig. 8 Fingertip and tactile sensor

<Left: finger, Right: thumb>

자유도를 생략하여, 구동기의 수를 줄이고 핸드를 인간의 손 크기와 비슷하도록 하였다. Fig. 1에서 나타난 것과 같이 일반 손가락은 종속 관절(coupled joint)을 포함한 3자유도를 가지고 있고, 엄지손가락은 안장 관절의 Yaw 자유도를 제외한 4자유도를 가지고 있다. 엄지손가락의 경우에는 마지막 관절이 물체의 형상과 크기에 따라 손가락이 파지를 행할 때 반대편에서 다양한 각도로 접근하여 물체를 잡아야 함으로 마지막 관절의 자유도가 필수적이다.

4.2 손가락 끝의 형상

인간의 손가락 끝은 단순히 둥근 타원 형상이 아니라 파지의 형태에 따라 사용되는 면이 나뉘

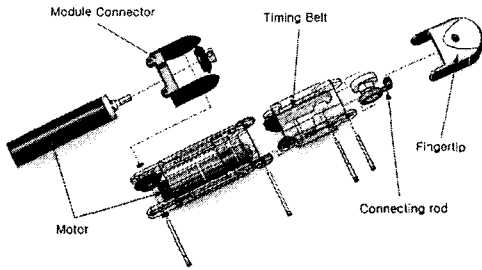


Fig. 9 Finger module

다면체의 면으로 이루어져 있다. Fig. 7에서와 같이 정밀파지(fingertip grasp)는 손톱 밑의 면을 사용하고, 작거나 긴 물체를 좀 더 강력하고 안정하게 파지하는 집기(pinch grasp)는 손가락 끝의 옆면이 사용된다. 물체를 감싸 쥐는 강력파지의 경우는 손가락, 엄지손가락, 손바닥이 면을 사용하여 물체를 구속하고, 마지막으로 손가락 끝이 밑면으로 물체를 구속한다.

실제 제작된 SKKU Hand II의 손가락 끝의 모양은 Fig 9과 같이 기능에 따라 사용 면을 구분할 있는 다면체의 구조로 되어있으며, 힘의 세기 및 미끌림을 측정 할 수 있는 PVDF센서가 내장 되어 있다.

4.3 손가락 모듈

Fig. 9의 손가락 모듈은 길이는 115mm, 폭은 22.5mm로 일반 성인 남자 손가락의 약 1.1배 크기이다. 모터를 링크내부에 장착하여 구동기 자체가 손가락의 링크를 이루는 구조를 사용하였다. 특히 손가락 모듈 각각의 부분 또한 모듈화하여 구동부 및 제어부가 쉽게 분리 될 수 있도록 하였다. 각 관절은 베벨기어를 사용한 두 개의 DC모터로 구동되며, 원위 손가락 뼈 사이 관절의 움직임은 근위 손가락 뼈 사이 관절의 움직임과 일정한 비율로 움직이도록 Fig. 10처럼 타이밍 벨트로 구동된다. 손가락 모듈의 좌표계 및 구동 범위는 Fig. 12와 Table 2와 같다. 손가락 끝(fingertip)은 촉각센서와 같은 외부 센서와 관련 회로부의 통합, 유지 및 보수를 용이하게 하기 위하여 다른 링크와 달리 연결바(connecting rod) 사용하여 또 하나의 모듈로 분리시키고, 개방 구조로 상단과 하단의 분리가 나사 체결로 용이하도록 하였다.

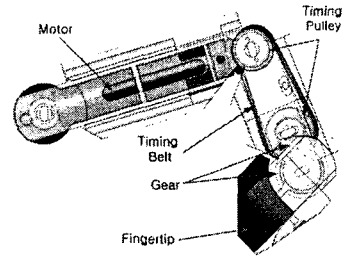


Fig. 10 Principal of grasping finger

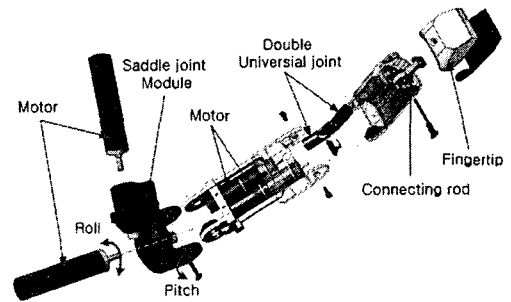


Fig. 11 Thumb module

4.4 엄지손가락 모듈

폭 28mm, 길이 139mm로 성인 남자의 1.1배이다. 손가락 모듈과 달리 다양한 각도를 이루며 손가락과 대립하여야 하기 때문에 자유도 생략을 줄이고 인간의 엄지와 비슷한 운동을 가능하도록 하였다. Fig. 11와 같이 모터는 되도록 엄지손가락의 기초부분으로 배치하여, 구동기의 공간 및 무게에 대한 문제를 해결 하였다. 마지막 관절의 구동은 모터를 첫 번째 링크에 내장 하고, 더블 유니버설(Double Universal Joint)를 사용하여 동력 전달을 하였다. 또한 안장관절(Saddle joint)을 모사하기 위한 메커니즘을 구현 하였다. 안장관절에 해당하는 두 개의 모터를 엄지손가락 링크 밖에 위치시킴으로써 무게에 대한 부담을 줄이고 모터 제어부를 손바닥 안에 장착함으로써 배선을 용이하게 설계하였다. 각 관절에 1:1 베벨기어를 사용하였으며, 작은 물체의 집기(fingertip grasp)시에 안장관절의 Roll 축만으로 파지가 이루어지므로 2:1 감속을 하여 기판 하중을 높였다. 엄지손가락 모듈역시 개방 구조로 분해 조립을 쉽게 하였다.

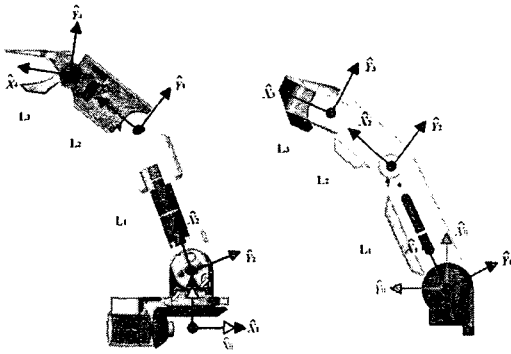


Fig. 12 The Coordinate System of finger (right: thumb, left: finger)

Table 2 Kinematic Parameter

| Joint angles(deg) | | |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| | Finger | Thumb |
| θ_1 | $[-45^\circ \ 90^\circ]$ | $[-90^\circ \ 0^\circ]$ |
| θ_2 | $[-0^\circ \ 100^\circ]$ | $[0^\circ \ 90^\circ]$ |
| θ_3 | $[0^\circ \ 70^\circ]$ | $[0^\circ \ 90^\circ]$ |
| θ_4 | - | $[0^\circ \ 90^\circ]$ |

4.5 손바닥 모듈

손바닥 모듈(Fig. 13)은 프레임 구조로 로봇 손가락과 엄지손가락이 장착되며, 물건의 파지 시 손가락의 물건을 감싸 쥐는 방향이 한 점으로 모이는 기능을 구현하기 위하여 각 손가락의 장착 각을 10°로 하였다. 프레임의 무게를 줄이고 제어부 관련 회로를 내장하기 위하여 내부에 홈을 두고, 모터 컨트롤러를 내장하도록 하였다.

4.6 제어 모듈

각각의 손가락모듈들을 제어 하기위해 별도의 모터 제어 모듈을 개발하였다. 이러한 각각의 제어 모듈은 로봇 핸드의 독립적인 시스템 개발을 위해 필요하며, Fig. 14와 같은 소형의 제어 모듈로 개발하였다. 각각의 모듈들 사이는 CAN 통신을 사용하여 상호 통신 및 외부 제어가 가능하도록 하였다. 모터 컨트롤러는 PID방식을 사용하며, 모터의 상태 및 토크의 확인하기 위한 실시간으로 전류를 측정 할 수 있게 구성 되었다.

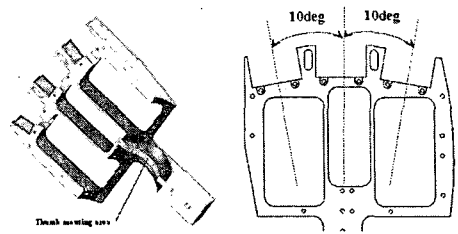


Fig. 13 Palm module

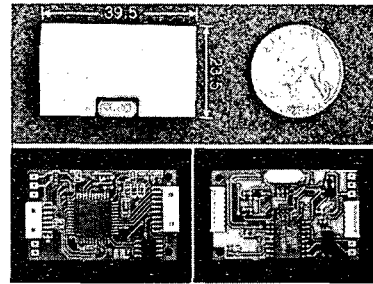


Fig. 14 Control board



Fig. 15 Movement of SKKU Hand II

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 집게 방식을 탈피한 실제의 인간의 손을 개발하여 강력파지와 정밀파지를 동시에 묘사 할 수 있게 하였다. 특히 기존의 인간형 로봇과 달리 엄지손가락의 안장관절을 구현 하여 더욱 인간의 손과 비슷하게 동작하며, 전원을 제외한 모든 부분을 모듈화 하여 내장하였다. 이러한 완벽한 모듈화의 결과 로봇 손의 적용을 쉽게 할 수 있게 하였다. Fig 15는 SKKU Hand II가 실제 물통을 사람에게서 건네받는 시뮬레이션 영상이다.

앞으로 촉각센서를 장착하여 외부의 물체에 대한 촉감과 악력을 느끼게 하여 더욱 인간과 동일한 움직임을 구현 하도록 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원에 몰입형 실감 공간 기술 개발의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mason, M. Y. and Kenneth Salisbury J., 1985, "Robot Hands and the Mechanics of Manipulation," *The MIT press*.
- (2) Craig, J. J., 1989, "Introduction to Robotics Mechanics and Control," *Addison Wesley*.
- (3) Venkataraman, S. T. and Iberall, T., 1989, "Dexterous Robot Hands," *Springer Verlag*.
- (4) Calais-Germain, B., 1993, "Anatomy of Movement," *Eastland Press*
- (5) Napier J. R., 1980, "Hands," *Princeton University Press*.
- (6) Wehr, M. and Weinmann, M., 1999, "Die Hand-Werkzeug des Geistes," *Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg*
- (7) Saladin, K. S., 2001, "Anatomy and Physiology : The Unity of Form and Function," *MacGraw-Hill*
- (8) Mader, S. S., 2001, "Understanding Human Anatomy and Physiology," *MacGraw-Hill*
- (9) Kawasaki, H., Komatsu T. and Uchiyama K., 2002, "Dexterous Anthropomorphic Robot Hand With Distributed Tactile Sensor: Gifu Hand II," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No. 3, pp. 296~303.
- (10) Kyriakopoulos, K. J., Riper, J. V., Zink, A. and Stephanou, H. E., 1997, "Kinematic Analysis and Position/Force Control of the Anthrobot Hand," *IEEE/ASME Transactions on Systems, Man And, Cybernetics*, Part B Vol. 27, pp. 95~104.
- (11) Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M. and Kaneko, M., 2003, "Development of Highspeed Multifingered Hand System and Its Application to Catching," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2666~2671.
- (12) Butterfass, J., Hirzinger, G., Knoch, S. and Liu, H., 1998, "DLR's Multisensory Articulated Hand Part I : Hard and Soft Architecture," *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*.
- (13) Butterfass, J., Grebensteion, M., Hirzinger, G. and Liu, H., 2001, "DLR-Hand II : Next Generation of a Dexterous Robot Hand," *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*, pp. 109~114.
- (14) Lovchik, C. S. and Diftler, M. A., 1999, "The Robonaut Hand: A Dexterous Robot Hand For Space," *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*, pp. 907~912.
- (15) Yamano, I., Takemura, K. and Maeno, T., 2003, "Development of a Robot Finger for Five-fingered Hand using Ultrasonic Motors," *IROS'03., Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference in Robotics and Automaiton*, Vol. 23, No. 4, pp. 2648~2563.
- (16) Wilkinson, D. D., Weghe, M. V. and Matsuoka, Y., 2003, "An Extensor Mechanism for an Anatomical Robotic Hand," *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 238~243.
- (17) Hirzinger, G., Butterfass, J., Fischer, M. and Grebenstein, M., 2000, "A Mechatronics Approach to the Desing of Light-Weight Arms and Multifingered Hands," *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 46~54.
- (18) Gahara, Y., Kawato, Y., Takemura, K. and Maeno, T., 2003, "A Wire-Driven Miniature Five Fingered Robot Hand using Elastic Elements as Joints," *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2672~2677.