

와이어 기반의 적응형 로봇 핸드

Tendon-driven Adaptive Robot Hand

유 홍 선¹, 김 민 철², 송 재 복[†]

Yu Hong-Seon¹, Kim Min-Cheol², Song Jae-Bok[†]

Abstract An adaptive robot hand (AR-Hand) has a stable grasp of different objects in unstructured environments. In this study, we propose an AR-Hand based on a tendon-driven mechanism which consists of 4 fingers and 12 DOFs. It weighs 0.5 kg and can grasp an object up to 1 kg. This hand based on the adaptive grasp mechanism is able to provide a stable grasp without a complex control algorithm or sensor system. The fingers are driven by simple tendon structures with each finger capable of adaptively grasping the objects. This paper presents a method to decide the joint stiffness. The adaptive grasping is verified by various grasping experiments involving objects with different shapes and sizes.

Keywords: Robot hand, Adaptive grasp, Under-actuated mechanism

1. 서 론

최근 다양한 형태의 로봇이 산업 분야에 널리 적용되고, 서비스 로봇의 개발 및 보급이 확대되고 있다. 이에 따라 다양한 물체를 안정적으로 파지할 수 있는 로봇 핸드의 필요성이 증대되고 있다^[1]. 기존에는 그리퍼가 산업용 로봇의 말단장치로 널리 적용되었지만, 그리퍼의 경우 손가락 부분에 관절이 없거나 또는 종속된 하나의 관절만을 갖는다. 이러한 적은 수의 그리퍼는 다양한 형상과 형태의 물체를 파지하는 데 있어 제한적이다^[2].

따라서 사람의 손과 같이 다양한 작업을 하는 데 있어 유리한 로봇 핸드에 대한 많은 연구가 수행되었다. 일반적으로 로봇 핸드는 3개 이상의 손가락으로 구성되어 있고, 각 손가락은 2-3개의 관절을 갖는다. 또한 대부분의 로봇 핸드의 각 관절마다 액츄에이터가 삽입되어 능동적으로 구동되며, 이를 구동하기 위하여 다양한 센서 시스템과 복잡한 제어 알고리즘을 필요로 한다. 대표적으로 사람의 손

과 유사하게 5개의 손가락으로 구성된 Utah/MIT Hand^[3]는 35개의 공압 액츄에이터가 사용되어 총 33자유도를 갖는다. 그리고 각 관절의 회전 변위 측정용 센서와 장력 측정용 센서 등 많은 센서와 액츄에이터를 이용하여 사람과 유사한 모션을 구현하기 위해 매우 복잡한 제어 시스템이 이용된다. DLR Hand II^[4] 또한 사람의 손과 유사한 크기에 5개의 손가락을 가지고 있는데, 각 손가락의 3개의 관절에 BLDC 모터와 관절 토크센서 및 손 끝에는 6축 힘/토크 센서가 부착되어 있다. 그 밖에 Stanford/JPL Hand^[5], KITECH Hand^[6], SKKU hand^[7], 그리고 UB hand^[8] 등과 같이 대부분의 로봇 핸드는 많은 센서와 액츄에이터를 사용하므로 다양한 핸드의 동작을 구현할 수는 있지만, 복잡한 제어 알고리즘 및 제어 시스템이 필요하다. 또한, 높은 가격과 복잡한 시스템으로 인한 낮은 신뢰성으로 인하여 로봇 핸드 가 널리 보급되지 못하고 있다.

최근 다양한 형상의 물체를 효과적으로 파지할 수 있는 저렴한 로봇 핸드 가 활발히 개발되고 있다. 로봇 핸드의 관절 수보다 작은 수의 액츄에이터를 갖는 부족 구동 메커니즘(under-actuated mechanism) 기반의 로봇 핸드는 최소한의 액츄에이터만을 이용하므로 낮은 가격으로 제작이 가능하고, 실용성이 우수하다^[2]. 이들 로봇 핸드 는 와이어

Received : Aug. 4. 2014; Reviewed : Sep. 1. 2014; Accepted : Oct. 27. 2014

※ 본 연구는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NO. 2007-0056094)

† Corresponding author: Mechanical Engineering, Korea University, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul, Korea (jbsong@korea.ac.kr)

1 Mechatronics, Korea University (gajest@korea.ac.kr)

2 Mechanical Engineering, Korea University (baller@korea.ac.kr)

기반의 메커니즘과 링크 기반의 메커니즘으로 분류된다. 대표적인 와이어 구조의 부족 구동 메커니즘의 로봇 핸드에는 SDM Hand^[9], THE Second Hand^[10], SPRING Hand^[11], 그리고 MANUS-Hand^[12] 등이 있고, 링크 기반의 대표적인 로봇 핸드로는 LARM hand^[13] 등이 있다. 링크 구조의 로봇 핸드에는 와이어 구조에 비하여 관절들이 연동되어 동작되기 위한 복잡한 메커니즘을 필요로 하고, 물체의 형상에 따라 적응형 파지(adaptive grasping)를 위한 메커니즘을 포함하여 비교적 중량이 무거운 단점을 갖는다. 그리고 와이어를 이용한 부족 구동 메커니즘의 적응형 로봇 핸드에는 적응형 파지를 구현하기 위해 많은 수의 풀리와 와이어를 사용하므로 크기가 커지고, 마찰 등과 같은 문제가 발생하는 단점을 갖는다.

본 논문에서 제안하는 와이어 기반의 적응형 핸드(Adaptive Robot Hand, AR-Hand)는 산업용 그리퍼, 지능형 핸드, 그리고 부족 구동 관절 핸드의 단점들을 보완한 것이라고 할 수 있다. 4개의 능동관절과 8개의 종속관절로 구성된 AR-Hand는 와이어를 이용하여 각 종속관절에 부족 구동 관절 메커니즘으로 동력을 전달한다. 또한 각 관절에 스프링을 장착하여 단순하게 적응형 파지를 위한 메커니즘을 구성함으로써 가볍고 작은 형태를 가진다. 따라서 복잡한 제어 알고리즘이나 센서 없이도 손가락이 물체에 접촉하는 면적을 최대화할 수 있어 다양한 형상과 크기의 물체를 안정적으로 파지할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 적응형 핸드의 기본 원리에 대하여 설명한다. 3장에서는 본 연구에서 개발된 AR-Hand의 손가락과 손바닥 설계에 대해 설명하고, 4장에서는 시제품 개발 및 다양한 형상과 크기의 물체를 안정적으로 파지하는 실험을 통하여 제안한 AR-Hand의 성능을 검증한다. 마지막으로, 5장에서 결론을 도출한다.

2. 적응형 로봇 핸드(AR-Hand)

2.1 적응형 로봇 핸드

종속 관절로 구성된 부족 구동(under-actuated) 관절 메커니즘의 AR-Hand는 복잡한 구조의 로봇 핸드에 비해 간단한 제어 시스템 및 높은 신뢰성을 갖는다. 두 개의 관절이 종속되어 있는 손가락의 적응형 파지 과정은 Fig. 1과 같다.

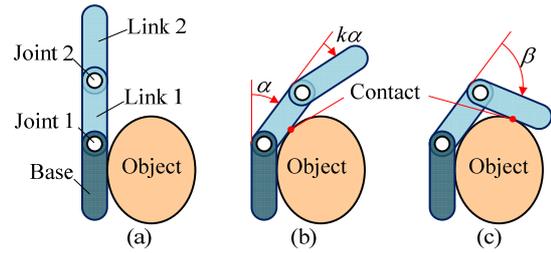


Fig. 1. Action process of the coupled two joints of the finger: (a) at rest, (b) when the first joint rotates by α , and (c) adaptive grasping^[13].

Figure 1(a)와 같이 손가락의 링크 1이 물체와 접촉하기 전에는 Fig. 1(b)와 같이 관절 1이 α 만큼 회전하고, 관절 2는 첫 번째 관절의 회전 변위 α 에 일정한 비율 k 만큼 회전하게 된다. 그리고 Fig. 1(b)와 같이 이미 링크 1이 물체와 접촉하게 되면, Fig. 1(c)와 같이 접촉이 이루어진 링크 1은 고정되고, 물체와 접촉하지 않은 링크 2가 β 만큼 회전하여 물체를 감싸게 되어 안정적으로 움켜질 수 있다.

따라서 AR-Hand는 Fig. 2(a)와 같이 얇은 물체의 경우 관절 1을 제외한 관절 2와 3은 거의 회전하지 않으므로 손가락 끝으로 물체를 파지할 수 있다. 또는 Fig. 2(b)와 같이 둥근 물체나 Fig. 2(c)와 같이 각진 형상의 물체도 가장 안쪽의 링크가 먼저 접촉하여 물체를 감싸 질 수 있다. 이와 같이 종속 관절로 구성된 AR-Hand는 물체의 미지의 형상에 대해 적응형 파지를 가능하게 하므로 물체의 다양한 형상에 대해 안정적인 파지가 가능하다.

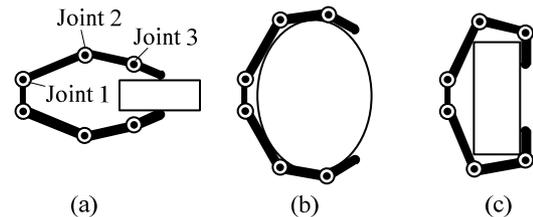


Fig. 2. Adaptive grasping of AR-Hand: grasping (a) a thin object, (b) a round object, and (c) a rectangular object.

2.2 적응형 로봇 핸드 메커니즘

AR-Hand의 손가락은 Fig. 3과 같이 모든 관절이 와이어로 연결되어 종속적으로 구동된다. 각 관절에 k_1, k_2, k_3 의 강성을 가지는 탄성 요소가 연결된다. 액츄에이터에 의해 장력 F_i 가 작용하고, 각 관절의 반경이 r_1, r_2, r_3 일 때, 관절 토

크는 $\tau_n = F_T r_n$ 이 된다. 이때, 관절의 회전 변위 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 와 장력 F_T 사이의 관계는 손가락의 각 링크에 따로 외력이 작용하지 않는 경우 다음과 같이 계산된다.

$$F_T = \frac{k_1 \theta_1}{r_1} = \frac{k_2 \theta_2}{r_2} = \frac{k_3 \theta_3}{r_3} \quad (1)$$

$$\theta_n = \frac{r_n F_T}{k_n} \quad (n=1,2,3) \quad (2)$$

따라서 관절 변위 θ_n 은 관절 반경 r_n 과 관절 강성 k_n 의 비율로 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_1 : \theta_2 : \theta_3 = \frac{r_1}{k_1} : \frac{r_2}{k_2} : \frac{r_3}{k_3} \quad (3)$$

즉, 손가락의 관절 변위는 관절 반경 r_n 과 비례 관계에 있으며, 관절 강성 k_n 과는 반비례 관계를 갖는다. 적응형 파지를 구현하기 위해서는 관절 반경과 관절 강성의 적절한 선정이 필요하지만, 로봇 핸드의 무게 및 크기를 최소화해야 하므로 관절 반경을 변경하기는 어렵다. 따라서 관절 강성을 조절하여 적응형 파지를 구현한다.

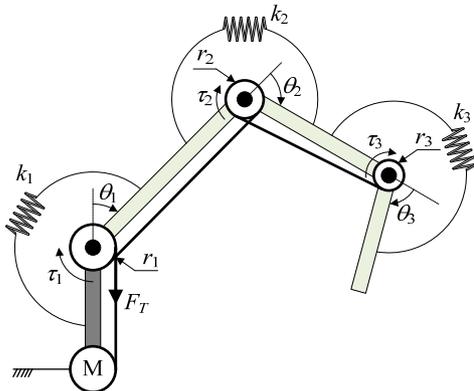


Fig. 3. Kinematic diagram of the finger mechanism.

3. AR-Hand의 개발

3.1 AR-Hand의 손가락 설계

AR-Hand의 손가락은 Fig. 4와 같이 3개의 관절로 구성된다. 손가락의 링크 1은 37.5 mm, 링크 2는 35 mm, 그리고 링크 3은 27.5 mm로 전체 길이는 100 mm이고, 폭은 20

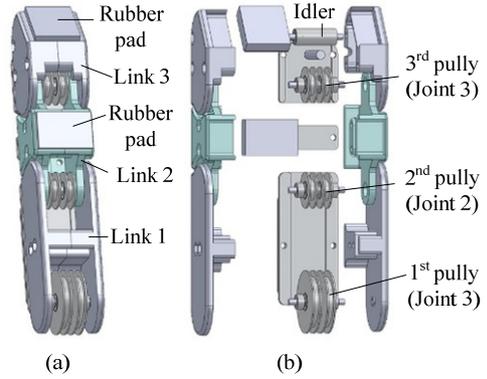


Fig. 4. Finger of AR-Hand: (a) assembly, and (b) components.

mm, 두께는 20 mm이다. 각 관절은 와이어가 지나갈 수 있도록 풀리를 사용하였고, 모든 관절은 $0 \sim 90^\circ$ 의 회전 범위를 갖는다. 그리고 손가락 끝 부분과 중간 부분의 링크 3과 링크 2에 고무패드를 부착하여 물체 파지 시의 미끄러짐을 방지하였다.

Figure 5에 나타낸 바와 같이 AR-Hand의 손가락은 3개의 관절과 스프링으로 구성된다. 손바닥과 손가락 사이는 인장 스프링으로 연결하였고, 손가락 관절 사이는 판 스프링으로 연결하였다. 와이어는 각 관절의 풀리를 지나 한쪽 끝은 손바닥에 고정되고, 다른 한쪽은 모터와 연결된 구동 풀리에 연결된다.

각 관절의 반경 $r_1 = 8.5$ mm, $r_2 = 3.5$ mm, $r_3 = 3.5$ mm이다. 적응형 파지(adaptive grasping)를 구현하기 위해 강성은 $k_1 = 0.98$ N/mm, $k_2 = 4$ N/mm, 그리고 $k_3 = 8$ N/mm로 설정하였다. 관절의 회전 변위는 식 (3)의 관계에 따라 $90:9:4.5$ 의 비율을 가지므로 관절 1이 90° 회전할 때, 관절 2와 관절 3은 각각 9° 와 4.5° 회전한다. 따라서 물체를 파지할 때

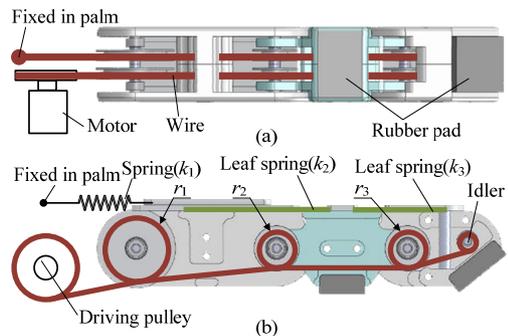


Fig. 5. Finger of AR-Hand: (a) front view, and (b) side sectional view

관절 1은 관절 2와 3에 비해 많은 회전을 하므로 링크 1이 먼저 물체에 접촉한다. 다음으로 관절 2가 물체에 접촉하고, 마지막으로 링크 3이 접촉하므로 물체의 형상에 맞추어 감싸 쥐는 적응형 파지가 가능하게 된다.

3.2 AR-Hand의 손바닥 설계

본 연구에서 개발한 AR-Hand의 무게는 0.5 kg이며, 손바닥의 크기는 80 mm x 70 mm x 48 mm이다. AR-Hand는 Fig. 6(a)와 같이 왼손으로 총 4개의 손가락으로 구성되어 있다. 손가락은 손바닥에 위치한 DC모터에 연결된 구동 풀리를 통해 와이어로 구동된다. 모터는 손바닥의 크기를 최소화하기 위해 Fig. 6(b)와 같이 서로 평행하게 배치하였다.

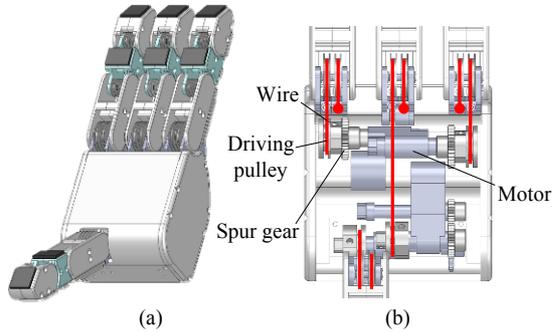


Fig. 6. AR-Hand: (a) drawing of the assembly, and (b) internal view of the palm.

4. 시제품 제작 및 성능 실험

4.1 AR-Hand 시제품 개발

본 연구에서 개발된 AR-Hand에는 Fig. 7과 같이 기어비 64:1인 유성기어를 내장한 4개의 3 W DC모터(DCX 10 L)가 1.5:1의 평기어와 9.5 mm 반경의 구동 풀리를 통하여 손가락으로 동력을 전달함으로써 각 손가락의 운동을 제어할 수 있도록 하였다. 유성기어를 포함한 DC모터의 정격토크는 0.1 Nm이고, 평기어를 거친 토크는 0.15 Nm이다. 따라서 구동 풀리를 통해 와이어에 작용하는 장력 FT는 15.8 N이고, 각 관절에 작용하는 토크는 0.13 Nm, 0.05 Nm, 0.05 Nm이므로, 파지력은 1 N정도로 계산된. 모터의 회전속도는 5950 rpm이므로 구동 풀리의 회전속도는 372 %이다. 따라서 물체를 파지하지 않을 경우, 손가락이 완전히 펴진 상태에서 손바닥에 닿을 때까지 굽히기 위해서 당겨야 하

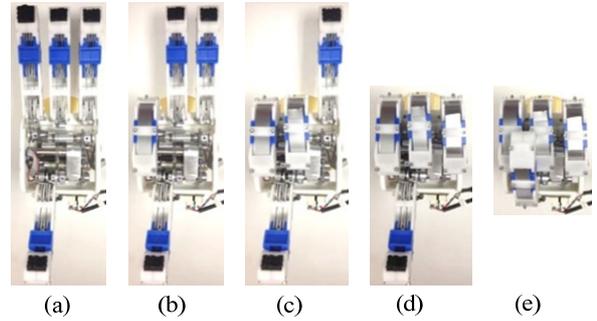


Fig. 7. Various configurations of AR-Hand

Table 1. Specifications of AR-Hand

Number of motors	4
Motor type	3W DC motor
Size	Finger length: 100 mm
	Palm: 80 mm x 70 mm x 48 mm
Weight	0.5 kg
Max. finger force	1.2 N

는 와이어의 길이는 30 mm이므로 걸리는 시간은 약 0.5초이다.

경량형 설계를 위하여 프레임은 폴리아세탈(polyacetal)을 사용하여 제작하였다. 이상에서 개발된 AR-Hand의 사양은 Table 1과 같다.

4.2 AR-Hand 성능 실험

AR-Hand의 성능을 검증하기 위하여 다양한 형상에 대한 파지를 실험을 수행하였다. 물체의 형상은 육면체, 구, 원기둥(원뿔)과 같은 도형의 조합으로 단순화될 수 있으므로, 이들 각 도형을 안정적으로 파지할 수 있으면 다양한 형상의 물체도 안정적으로 파지하는 것이 가능하다^[4]. 이를 검증하기 위하여 Fig. 8과 같이 야구공(구, $\phi 229$ mm, 146 g), 상자(육면체, 90 x 75 x 40 mm, 122 g), 텀블러(원기둥, $\phi 210$ mm, 300 g)을 대상으로 파지 실험을 수행하였으며, 추가적으로 복합적인 형상을 갖는 와인 잔(170 g)과 길이가 긴 화이트 보드 지우개(125 x 50 x 35 mm, 30 g) 및 얇은 형상의 CD 케이스(190 x 135 x 15 mm, 160 g)에 대해서도 동일한 실험을 반복하였다.

또한 손가락 끝을 이용한 파지를 검증하기 위해 탁상시계(58 x 58 x 36 mm, 70 g)와 풀 케이스($\phi 30$ mm, 51 g)에 대한

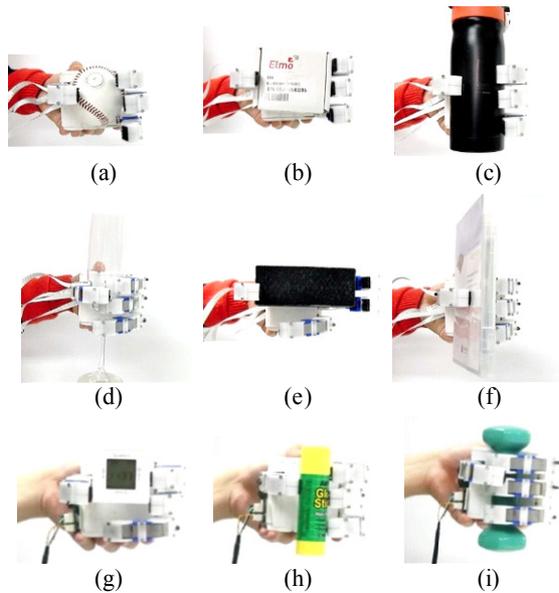


Fig. 8. AR-Hand grasping different objects; (a) baseball, (b) box, (c) tumbler, (d) wine glass, (e) whiteboard eraser, (f) CD case, (g) table clock, (h) glue stick, and (i) dumbbell.

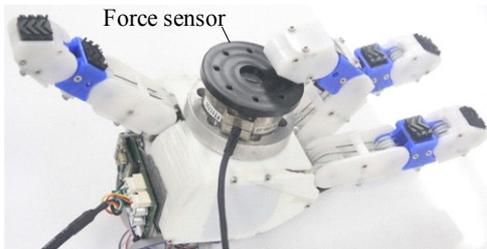


Fig. 9. Experimental setup for fingertip force measurement.

실험과 파지 가능한 최대 무게를 검증하기 위해 무게 1 kg의 아령에 대해 실험을 진행하였다. 이때 Fig. 8과 같이 다양한 형상과 크기에 대한 안정적인 파지가 가능하였다. 또한 Fig. 9와 같이 힘 센서를 이용한 실험을 통하여, 개발한 로봇 핸드의 파지 성능을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 와이어 기반의 적응형 파지가 가능한 적응형 로봇 핸드(AR-Hand)의 메커니즘을 제안하고 개발하였다. 그리고 AR-Hand를 이용하여 다양한 물체의 파지가 안정적으로 수행되는 것을 다양한 실험을 통하여 검증하였으며, 이로부터 총 12 자유도의 AR-Hand는 와이어 메커니즘 기반의 적응형 파지를 제공하므로 다양한 형상과 크

기의 물체를 안정적으로 파지가 가능하다는 결론을 도출하였다. 또한 부족 구동 관절 메커니즘 및 와이어 구동 기반으로 경량화된 로봇 핸드를 개발하였다.

References

- [1] E. H. Kim, S. W. Lee, and Y. K. Lee, "A Dexterous Robot Hand with a Bio-mimetic Mechanism," *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 227-235, 2011.
- [2] Li Guoxuan, Li Bowen, Sun Jie, Zhang Wenzeng, Sun Zhenguo, and Chen Qiang, "Development of a Directly Self-adaptive Robot Hand with Pulley-belt Mechanism," *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 8, pp. 1361-1368, 2013.
- [3] 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", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1520-1532, 1986.
- [4] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger, "DLR-Hand II: next generation of a dexterous robot hand", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 109-114, 2001.
- [5] J. K. Salisbury, and J. J. Craig, "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982.
- [6] H. D. Yang, S. W. Park, J. H. Park, J. H. Bae, and M. H. Baeg, "Development of a 16 DOF Anthropomorphic Robot Hand with Back-Drivability Joint for Stable Grasping," *The Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 6, No. 3, pp. 220-229, 2011.
- [7] J. Y. Chun, B. J. Choi, H. S. Chae, H. P. Moon, and H. R. Choi, "Design and Control of Anthropomorphic Robot hand," *The Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 5, No. 2, pp. 102-109, 2010.
- [8] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri, "Development of UB Hand 3: Early Results," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4488-4493, 2005.
- [9] A. M. Dollar, and R. D. Howe, "The SDM hand as a prosthetic terminal device: A feasibility study," *IEEE 10th Int. Conf. on Rehabilitation Robotics*, pp. 978-983, 2007.
- [10] G. Grioli, M. Catalano, E. Silvestro, S. Tono, and A. Bicchi, "Adaptive Synergies: an approach to the design of under-actuated robotic hands," *IEEE/RSJ Int. Conf. on*

- Intelligent Robots and Systems, pp. 1251-1256, 2012.
- [11] 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.
- [12] J. L. Pons, E. Rocon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, and W. Van Moorleghem, "The MANUS-HAND Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects," *Autonomous Robots*, Vol. 16, No. 2, pp. 143-163, 2004.
- [13] W. Licheng, G. Carbone, and M. Ceccarelli, "Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation," *Int. J. Mechanism and Machin Theory*, Vol. 44, pp. 336-348, 2009.
- [14] A.T. Miller, S. Knoop, H. I. Christensen, and P. K. Allen "Automatic grasp planning using shape primitives," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1824-1829, 2003.



유 흥 선

2011 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2012~현재 고려대학교 메카트로닉스학과 석박사통합과정 재학 중
 관심분야: 가변 강성 액츄에이터 및 로봇 핸드



김 민 철

2013 고려대학교 기계공학부 (공학사)
 2013~현재 고려대학교 기계공학부 석사과정 재학 중
 관심분야: 머니플레이터의 경로 생성 알고리즘



송 재 복

1983 서울대학교 기계공학과 (공학사)
 1986 서울대학교 기계공설계학과 (공학석사)
 1992 MIT 기계공학과 (공학박사)

1993~현재 고려대학교 기계공학부 교수.
 관심분야 : 다양한 머니플레이터의 개발, 이동로봇의 주행, 지능로봇시스템의 설계 및 제어