

형상적응형 파지와 케이징 파지가 가능한 부족구동 기반 로봇 의수 메커니즘 개발

Development of Under-actuated Robotic Hand Mechanism for Self-adaptive Grip and Caging Grasp

신민기[†] · 조장호¹ · 우현수¹ · 김기영¹

Minki Sin[†], Jang Ho Cho¹, Hyun Soo Woo¹, Kiyoung Kim¹

Abstract: This paper presents a simple and robust under-actuated robotic finger mechanism that enables self-adaptive grip, fingertip pinch, and caging grasp functions. In order to perform daily activities using hands, the fingers should be able to perform adaptive gripping and pinching motion, and the caging grasp function is required to realize natural gripping motions and improve grip reliability. However, general commercial prosthetic hands cannot implement all three functions because they use under-actuation mechanism and simple mechanical structure to achieve light-weight and high robustness characteristic. In this paper, new mechanism is proposed that maintains structural simplicity and implements all the three finger functions with simple one degree-of-freedom control through a combination of a four-bar linkage mechanism and a wire-driven mechanism. The basic structure and operating principle of the proposed finger mechanism were explained, and simulation and experiments using the prototype were conducted to verify the gripping performance of the proposed finger mechanism.

Keywords: Prosthetic Hand, Robotic Hand, Under-actuated Finger, Self-adaptive Grip, Caging Grasp

1. 서 론

손은 일상생활을 영위하는데 가장 필수적인 신체 부위로 인간은 손을 이용하여 다양한 물건을 사용하고 주변 환경과 상호작용을 한다. 과거부터 손동작을 체계적으로 분류하기 위한 연구가 다수 수행되었다. 기존 연구에 따르면 손동작은 크게는 잡기와 집기로 구분되며 엄지손가락의 방향, 물체와 접촉점 개수, 손바닥 사용 여부 등에 따라 작계는 6개에서 많게

는 30개 정도의 동작으로 구분된다^[1,2]. 이런 파지 동작 분류체계는 로봇 손 개발의 기준자료로 다양하게 활용되어왔다.

절단 환자의 신체기능 복원을 위한 로봇 의수도 최대한 많은 파지 동작을 구현하는 것을 목표로 한다. 하지만 사람의 손이 이러한 다양한 동작이 가능한 것은 작은 부피임에도 많은 관절을 가져 높은 자유도를 가지고 있기 때문이다^[3]. 그래서 사람의 손을 그대로 모사하는 고기능의 생체모사형 로봇 손에 관한 연구도 많이 수행되었으나 이들은 많은 수의 구동기와 복잡한 시스템을 가져 높은 가격, 무게, 제어의 어려움 등의 문제점으로 인해 실제 장애인을 위한 로봇 의수로 활용되지는 못하고 있다. 로봇 의수가 높은 상품성을 가지기 위해서는 경량성, 내구성, 제어 직관성, 낮은 가격, 긴 사용시간, 자연스러운 외관 등을 최대한 만족해야 한다^[4]. 이를 위해 상용 로봇 의수들은 기능성과 실용성의 타협을 위해 최대한 적은 수의 구동기로 최대한 많은 파지 기능을 구현하는 것을 목표로 한다.

최대한 많은 일상생활 기능을 구현하기 위해 상용 로봇 의수들은 가장 핵심적인 6가지 파지 동작인 구형 잡기, 원통 잡기,

Received : Aug. 29. 2022; Revised : Sep. 18. 2022; Accepted : Sep. 19. 2022

※ This work was supported by the projects Development of Human Enhancement Medicine Technologies for Rehabilitation of Lower and Upper Extremity Motor Functions (KIMM, NK238D), and A light-weight wearable upper limb rehabilitation robot system and untact self-training and assessment platform customizable for individual patient (Ministry of Trade, Industry and Energy, 20014480, MT3140)

1. Senior Researcher, Department of Medical Robotics, Korea Institute of Machinery & Materials, Daegu, Korea (jangho, woohs, kiyoung@kimm.re.kr)

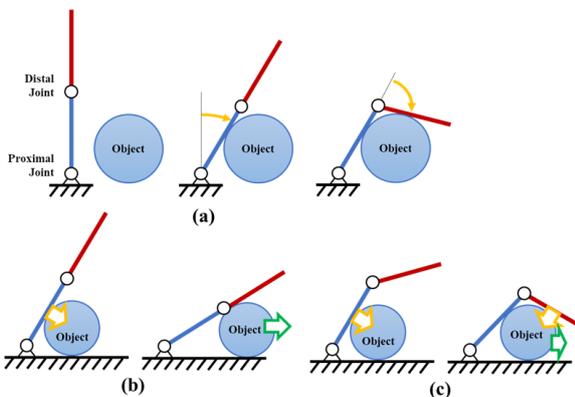
† Senior Researcher, Corresponding author: Department of Medical Robotics, Korea Institute of Machinery & Materials, Daegu, Korea (mksin@kimm.re.kr)

손바닥 잡기, 측면 잡기, 손끝 잡기, 갈고리 잡기 동작들을 구현하는 것을 목표로 한다⁵⁾. 이때 손가락은 형상적응형 파지 (Self-adaptive grip), 손끝 잡기(Tip pinch) 및 케이징 파지 (Caging grasp)의 3가지 동작이 가능해야 한다. 형상적응형 파지는 [Fig. 1(a)]와 같이 손가락의 근위부 관절부터 말단부 관절까지 물체의 표면에 순차적으로 접촉하며 물체를 감싸 쥐는 동작으로 접촉의 면적을 극대화하여 임의의 형상을 가진 물체에 대한 파지 성공률과 안정성을 높인다. 손끝 잡기는 작은 물체를 다루거나 정교한 작업을 하기 위한 기능으로 원활한 손끝 잡기를 위해서는 손끝만 물체에 접촉한 상태에서도 파지 자세 변형 없이 높은 파지력을 전달하는 것이 가능해야 한다. 케이징 파지는 잡기 동작 중 각 관절이 일정한 비율을 가지고 움직이는 동작 특성으로 [Fig. 1(b)], [Fig. 1(c)]에서 보여주듯이 케이징 동작이 없는 경우 물체가 가볍거나 공과 같이 쉽게 움직이는 경우 물체가 쉽게 빠져나가게 되나 케이징 동작이 있으면 물체가 빠져나가는 것을 막아 파지 성공률을 높여준다⁶⁾. 또한 케이징 파지는 실제 사람이 가지고 있는 동작 특성으로 이를 모사하면 파지 동작을 자연스러워 보이게 만들어 주는 장점이 있다.

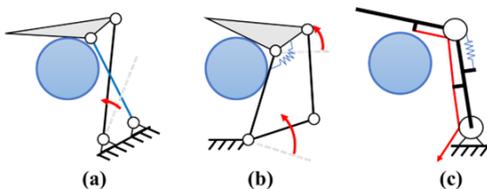
또한 로봇 의수들은 경량화와 사용 편의성 향상을 위해 부족구동(under-actuation) 메커니즘이 적용된 손가락 구조를 사용한다^{7,8)}. 부족구동이란 시스템의 자유도보다 적은 수의 구동기를 이용해 제어하는 방식으로 로봇 의수의 경우 한 손가

락의 여러 관절을 하나의 구동기로 구동하거나 여러 손가락을 하나의 구동기로 구동하는 방식을 말한다. 로봇 의수에 주로 사용되는 부족구동 메커니즘은 적응형 파지 기능 유무와 동력 전달 방식에 따라 크게 3가지가 있다 [Fig. 2]. 첫 번째는 리지드 커플링 방식으로 기계적 연결을 통해 하나의 관절 움직임에 여러 관절을 연동시켜 동시에 구동하는 방식이다. 이 방식은 하나의 손가락을 정해진 궤적으로만 움직이는 1자유도 시스템으로 만들어, 단순한 구조에 의한 높은 내구성과 신뢰성으로 인해 대다수의 상용 로봇 의수들이 이 방식을 사용한다⁹⁾. 또한 자연스러운 케이징 동작 구현이 가능하고 손끝 잡기 동작에서 안정적인 파지력 전달이 가능한 장점이 있지만 고정된 궤적으로 인해 적응형 파지는 불가능하고 파지 시 접점이 작아 파지 안정성이 떨어지는 단점이 있다. 두 번째는 적응형 파지가 가능한 링크 구동 방식으로 스프링과 혹은 기계적 리미터를 이용하여 관절의 순차적 움직임을 구현하는 방식으로는 로봇 손과 그리퍼들에서 다양하게 사용하는 방식이다⁹⁾. 이 방식은 단순한 1자유도 구동으로 사전정보가 없는 물체를 높은 안정성으로 잡을 수 있는 장점이 있지만, 케이징 동작 특성이 없어 손끝 잡기 동작 수행이 어려우며 충분한 저항력을 발생 시키지 못하는 가벼운 물체 파지가 어려운 한계점이 있다. 세 번째는 와이어 구동을 이용한 적응형 파지 구조로 와이어로 관절들을 연결 후 각 관절의 강성 혹은 풀리 직경, 모멘트암 차이 등을 통해 와이어가 당겨질 때 근위부 관절부터 순차적인 구동이 이뤄지는 구조이다¹⁰⁾. 이 방식은 구동부 부피가 작고 높은 경량성에 강성 설계에 따라 케이징 동작도 가능한 장점이 있지만, 수동형 소자의 특성이 전체 파지에 미치는 영향이 커서 외부 환경요소에 따라 동작 반복 신뢰성이 떨어지고 손끝 잡기 시 와이어의 장력이 올라가면 손가락의 자세가 틀어지는 한계가 있다. 이런 기본 구조들의 특성을 조합하여 세 가지 손가락 동작 특성을 모두 구현 가능한 손가락 메커니즘도 연구되었다. 대표적인 방법으로는 리지드 커플링 방식과 적응형 파지가 가능한 링크 구동 방식을 결합한 복합 링크지 구조를 사용하는 방법^{11,12)}이 있으나 부피가 커지고 복잡한 구조로 인한 내구성의 문제로 실용적인 로봇 의수로는 사용하기는 어려운 문제점이 있다.

본 연구에서는 실용성과 기능성을 모두 만족할 수 있는 로봇 의수를 위한 새로운 손가락 메커니즘을 제안한다. 제안하는 손가락 메커니즘은 4절 링크 구조와 와이어 구동의 특성을 결합하여 간단한 구조로 높은 내구성과 동작 신뢰성을 가지며 적응형 파지, 손끝 잡기, 케이징 파지를 구현하는 것을 목적으로 한다. 2장에서는 제안하는 메커니즘의 기본적인 구동원리를 소개하고 3장에서는 기구학 분석을 통한 설계 조건들을 도출하고 4,5장에서는 시뮬레이션과 시제품 제작을 통해 제안한 손가락 메커니즘을 검증한다.



[Fig. 1] Finger function to increase gripping success rate, (a) Self-adaptive grip, (b) Gripping light object without caging function and (c) Gripping light object with caging function



[Fig. 2] Basic Mechanism for Under-actuated Finger, (a) Rigid coupling, (b) Adaptive gripper, (c) Wire driven adaptive mechanism

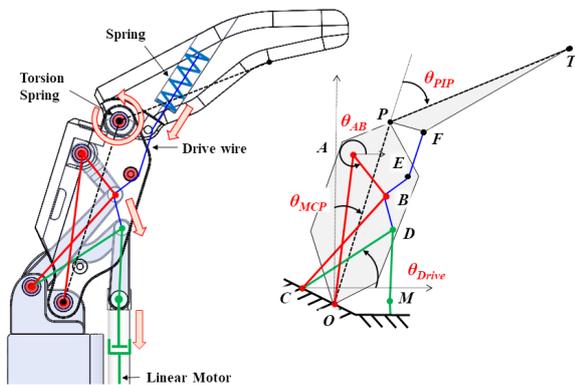
2. 구동 원리

2.1 메커니즘 구성

본 연구에서는 4절 링크 메커니즘과 와이어 구동 메커니즘의 결합을 통해 케이징 파지와 함께 적응형 잡기, 손끝 잡기가 모두 가능한 손가락 메커니즘을 제안한다.

[Fig. 3]은 본 연구에서 제안하는 손가락 구동 메커니즘이다. O점은 MCP (Metacarpophalangeal, 중수지관절), P점은 PIP (Proximal Interphalangeal, 근위지간 관절)에 해당하며 중절골과 말절골은 구조 단순화를 위해 하나의 강체로 구성하였다. 손가락 메커니즘은 크게 3가지 구성요소로 이루어져 있다. 모터와 연결된 구동 링크지 파트([Fig. 3]의 링크 CDM), 기절골의 4절 링크 파트([Fig. 3]의 링크 OABC) 및 와이어 텐션 유지를 위한 중절골 파트([Fig. 3]의 링크 PFT)이다. 각 요소는 기본적으로 분리되어 자유롭게 움직일 수 있지만 와이어를 통해 연결되어 있다.

구동 링크지 파트는 슬라이더 크랭크 구조로 되어 있으며 모터의 움직임에 따라 와이어를 당기는 역할 및 굴곡 각도를 제한하여 손동작을 구성하는 역할을 한다. 기절골 파트는 MCP 관절의 움직임에 따라 연동하는 4절 링크 구조로 와이어 풀리 역할을 하는 B점의 움직임을 제어하는 역할을 통해 전체 메커니즘의 동작 특성을 결정한다. 중절골 파트에는 두개의 스프링이 내장되어있다. P점에는 토션 스프링이 있어 항상 PIP관절이 최대한 펴져 있도록 함과 동시에 와이어가 느슨해지는 것을 방지한다. F점을 거쳐 와이어와 연결된 압축스프링은 손가락이 물체와 접촉한 이후 추가로 당겨지는 와이어에 의해 압축되며 장력 증가를 통해 파지력을 증가시키는 직렬탄성구동기(Series elastic actuator) 구성이다. 일반적인 의수의 경우 경량에서 높은 파지력을 내기 위해 높은 기어비의 구동기를 사용하는데 이 경우 기어박스의 높은 마찰력으로 인해 정밀한 파지력 제어가 어려운데 직렬탄성구동기의 특성을 이용하면 위치제어만으로도 파지력 제어를 가능하게 해주어 보



[Fig. 3] Kinematic configuration of the finger mechanism

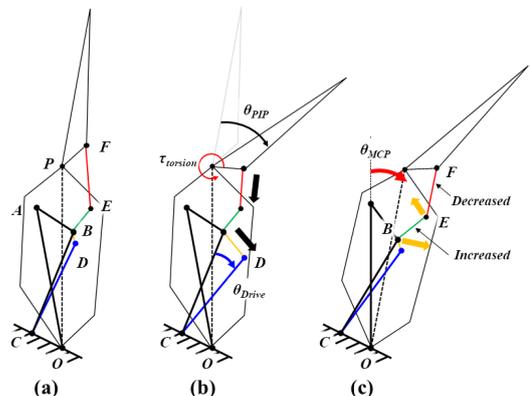
다 안전한 상호작용 구현이 가능하다.

2.2 구동원리

제안한 손가락 메커니즘의 기본적인 구동원리는 손가락의 각도에 따라 와이어가 연결된 세 점 사이 거리 \overline{DB} , \overline{BE} , \overline{EF} 의 비율이 변함에 따라 원하는 동작을 구현하는 것이다. [Fig. 4]는 물체와 접촉이 없는 상황에서의 움직임으로 이 과정을 순차적으로 살펴보면 다음과 같은 흐름에 의해 구동된다.

- 1) 선형구동기가 움직임에 따라 구동 링크 CD가 움직이면 와이어 길이 \overline{DB} 를 증가시킨다[Fig. 4(b)].
- 2) 당겨진 와이어가 풀리 B점에 아무 힘도 가하지 않았다고 가정하면 \overline{DB} 의 증가는 \overline{EF} 의 감소로 이어지게 되고 이는 P점의 토션 스프링을 압축시켜 와이어의 장력을 발생시키게 된다[Fig. 4(b)].
- 3) 와이어에 장력이 발생하게 되면 기절골 링크는 B점과 E점에서 힘을 받는데 E점에서 가해지는 장력의 방향은 \overrightarrow{OP} 와 평행에 가까운 반면 B점은 수직에 가까운 방향을 가져 결과적으로 기절골은 굴곡 방향으로 움직여 링크 BC와 링크 CD가 밀착한 상태로 돌아간다[Fig. 4(c)].
- 4) 결과적으로 \overline{DB} 길이는 초기값으로 돌아가게 되고 \overline{BE} 와 \overline{EF} 사이의 길이 교환만 발생하게 되며 MCP 관절이 회전함에 따라 \overline{BE} 길이가 늘어남에 따라 \overline{EF} 가 감소해 PIP 관절이 회전하게 된다[Fig. 4(c)].

이런 과정을 통해 MCP와 PIP 관절이 연동하여 손가락 케이징 동작을 구현한다. 그리고 이 과정 중 기절골 관절이 물체와 접촉한 경우에는, 물체에 의한 외력으로 인해 위의 과정 중 3)의 과정이 발생하지 못한다. 이때는 \overline{DB} 와 \overline{EF} 사이의 길이 교환만 이뤄지게 되어 PIP 관절만 구동하게 되며 적응형 파지



[Fig. 4] Working principle of the finger mechanism

구동을 하게 된다. 증절골 링크가 먼저 물체와 접촉한 경우에는 기절골 링크에 가해지는 장력과 물체에 의해 가해지는 반력에 의한 토크가 평형이 될 경우 손끝 집기 동작을 수행하게 된다. 이 조건에 대해서는 이후 기구학 분석을 통해 추가적인 서술을 한다. 각 경우에 대해서 물체와의 접촉에 의해 움직임이 정지된 이후 구동 링크가 움직이면 \overline{DB} 가 늘어남에 따라 직렬탄성구동기의 스프링이 압축되며 파지력을 증가시킨다.

3. 손가락 구조 설계

3.1 설계 목표

본 장에서는 목표한 구동원리를 안정적으로 구현하면서 의수로 사용될 수 있을 실제 사람의 파지 동작과 유사한 파지 궤적 구현이 가능한 설계변수 및 조건 도출을 위한 기구학 분석을 수행한다. 사람의 파지 동작을 모사하는 것은 심미적인 이 유도 있지만, 사용자의 직관성을 높이고 실제 파지 성공률을 높이는 효과도 있기 때문이다⁶⁾.

- 파지 동작을 구현하는 목표 조건들은 다음과 같다.
- 최대 구동 시 완전히 주먹을 쥔 자세가 되어야 한다(MCP, PIP 각 90°의 구동범위).
 - 동작 중 MCP와 PIP의 회전 비율은 1:1에 근접한다(실제 사람의 케이징 동작 중 특성¹³⁾).
 - 구현 가능한 높은 파지력을 구현한다.
 - 로봇 손의 크기는 일반 성인 손과 유사한 크기를 가진다.

따라서 이 조건들을 만족하기 위해 각 회전축의 위치 및 링크 길이 등의 설계 요구조건들을 도출한다.

3.2 기구학 분석 및 설계

제안한 구동원리는 와이어가 지나는 \overline{DB} , \overline{BE} , \overline{EF} 세 부위의 길이가 교환으로 이뤄지기 때문에 원하는 동작을 구현하기 위해서는 해당 자세에서 의도한 만큼의 길이 변화가 생기도록 설계하여야 한다.

우선 최대 가동범위를 구현하기 위한 조건을 생각해보면 MCP와 PIP 관절이 최대한 1:1에 가까운 비율을 가지며 움직임이 각각 최대 90°의 구동 각을 가지는 것이다. 물체와 접촉이 없는 경우 링크 CB와 링크 CD는 항상 접촉된 상황을 유지하기 때문에 \overline{DB} 의 길이는 항상 일정하고 따라서 비접촉 상황에서는 \overline{BE} , \overline{EF} 둘 사이의 길이가 교환이 발생한다.

[Fig. 4]에 보이듯 \overline{BE} 와 \overline{EF} 의 길이가 교환은 4절 링크 구조

의 움직임에 의해 B점이 움직이면서 발생한다.

각 와이어 길이는 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \overline{FE}^2 &= \overline{PF}^2 + \overline{PE}^2 - 2 \overline{PF} \cdot \overline{PE} \cos \Delta\theta_{FPE} \\ \overline{BE}^2 &= \overline{AE}^2 + \overline{AB}^2 - 2 \overline{AE} \cdot \overline{AB} \cos \Delta\theta_{EAB} \end{aligned} \quad (1)$$

목표로 하는 최대 구동 시 자세를 구현하기 위해서는 기절골의 각도 θ_{MCP} 가 90°가 될 때 \overline{BE} 의 길이와 \overline{EF} 의 길이가 같아야 한다.

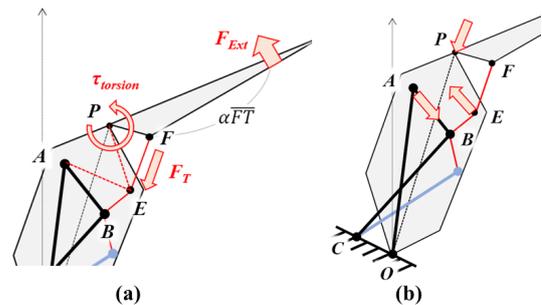
식 (1)의 조건을 간략화하기 위해 증절골에서 만들어진 파지력을 최대화하는 조건을 위해 P점을 중심으로 와이어의 장력과 물체에 가해지는 파지력에 의한 평형식은 식 (2)와 같다 [Fig. 5(a)].

$$\tau_P = -\overrightarrow{PF} \times F_T \frac{\overrightarrow{FE}}{|\overrightarrow{FE}|} + \alpha \overrightarrow{FT} \times \overrightarrow{F_{Ext}} + K_{PIP} \Delta\theta_{PIP} \quad (2)$$

여기서 F_T 는 와이어의 장력, $\overrightarrow{F_{Ext}}$ 는 손가락에 의해 물체에 가해지는 외력이며 α 는 링크 \overline{FT} 에서 물체와의 접점을 나타내기 위한 변수이다. 식 (2)에 따르면 안정적인 파지가 이뤄진 $\tau_P = 0$ 이 된 경우, 파지력을 극대화하기 위해서는 \overline{PF} 의 길이는 손의 형상이 허가하는 한 긴 것이 유리하다. 즉 최종 파지 자세에 의해 PIP 관절의 구동범위는 90°이며 \overline{PF} 길이는 최대 손 크기를 기준으로 결정되면 이 값들을 경계조건으로 \overline{AB} 길이, θ_2 가동범위, E점의 위치를 결정하는 것이 필요하다.

E점의 위치를 결정하기 위해서는 와이어 장력에 의해 발생하는 기절골에서의 힘 평형을 고려해야 한다[Fig. 5(b)].

$$\begin{aligned} \tau_O &= \overrightarrow{OA} \times F_T \left(\frac{\overrightarrow{BD}}{|\overrightarrow{BD}|} + \frac{\overrightarrow{BE}}{|\overrightarrow{BE}|} \right) \\ &+ \overrightarrow{OE} \times F_T \left(\frac{\overrightarrow{EF}}{|\overrightarrow{EF}|} + \frac{\overrightarrow{EB}}{|\overrightarrow{EB}|} \right) + \overrightarrow{OP} \times \overrightarrow{F_P} \end{aligned} \quad (3)$$



[Fig. 5] Force acting on each phalange, (a) Proximal Interphalangeal, (b) Metacarpophalangeal

식 (3)은 O점을 기준으로 와이어 장력과 중절골을 통해 전달된 외력 \vec{F}_p 에 의한 기절골의 토크를 나타낸다. 기절골의 파괴력을 최대화하기 위해서는 E점에서 발생하는 반시계방향의 토크를 최대한 경감할 수 있는 위치에 E점을 선정하는 것이 필요하고 이를 위해서 E점은 모든 PIP 관절의 구동범위에서 \vec{EF} 와 \vec{OE} 가 평행에 가깝게 해야하며 식 (1)의 \vec{BE} 와 \vec{EF} 의 관계를 항상 유사하게 하기 \vec{AE} 와 \vec{PE} 를 동일하게 하는 것이 유리하여 이를 고려한 E점의 위치를 설정한다.

4절 링크에 의해 구동되는 B점의 움직임을 통해 \vec{BE} 와 \vec{EF} 의 길이 변화를 최대한 비슷하게 구현하기 위해서는 \vec{AB} 에 의한 θ_2 의 가동 범위를 최대화하는 것이 필요하다. 또한 MCP 관절이 회전에 따라 \vec{BE} 의 길이가 항상 증가하게 하기 위해서는 B점이 항상 E점 아래에 위치해야 한다. 이를 위해 4절 링크는 최대 구동 각에서 $\vec{CA} = \vec{CB} + \vec{BA}$ 가 되도록 구성한다. 해당 자세가 θ_{AB} 구동범위의 최소점이 된다. 구동범위의 최대점은 \vec{BC} 와 \vec{AB} 의 길이 비율에 의해 결정되게 되며 이를 고려하여 의도한 와이어 길이 변화량이 구현되도록 각 링크의 길이를 설계한다.

위에서 도출된 E점의 위치 조건과 4절 링크의 길이 비율의 조건을 바탕으로 각 링크의 길이와 점의 위치들을 결정하였다. 정량 수치 결정을 위한 기준은 기절골의 길이(\vec{OP})로 일반 성인 남성과 여성의 평균 정도의 크기인 36 mm로 설정하고 이 값을 기준으로 다른 링크들의 크기를 결정하였다. 선정 결과는 [Table 1]에 나온 것과 같다.

4. 시뮬레이션

본 파트에서는 앞선 기구학 해석을 통해 설계한 손가락 메커니즘의 목표 파지 동작 구현 성능을 검증한다. 이를 위해 각 파지 시나리오에서 구동링크의 움직임에 따라 구현되는 MCP, PIP 관절의 각도 변화 및 이 과정에서 장력의 변화를 시뮬레이션하였다.

[Table 1] Kinematic Parameters of Finger

MCP Joint	\vec{OP}	36 mm	Drive unit	\vec{CD}	21 mm
	\vec{OA}	28.44 mm		\vec{DM}	13.5 mm
	\vec{AB}	10 mm		\vec{OM}	10.5 mm
	\vec{BC}	23.5 mm	PIP Joint	\vec{PF}	6.36 mm
	\vec{CA}	6.7 mm		\vec{FT}	24 mm
	$\angle POA$	10°		$\angle PF$	45°
Routing Path	$\angle POC$	63.43°	$\angle PFT$	135°	
	\vec{OE}	28.53 mm	K_{PIP}	1.32 N/deg	
	$\angle POE$	11.12°	K_{SEA}	8.7 N/mm	

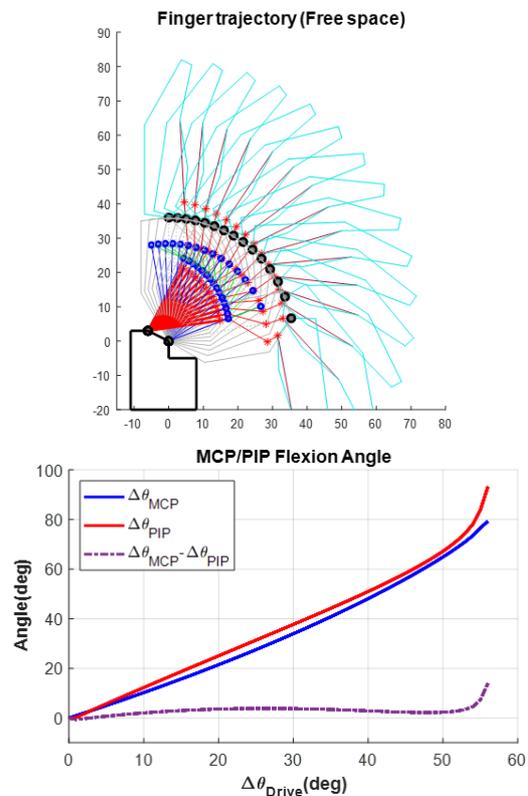
4.1 비접촉 상태 동작 궤적

비접촉 상태 동작 중 MCP와 PIP 관절의 동작 비율에 따른 케이징 파지 및 최대 구동범위에서의 자세를 검증하였다.

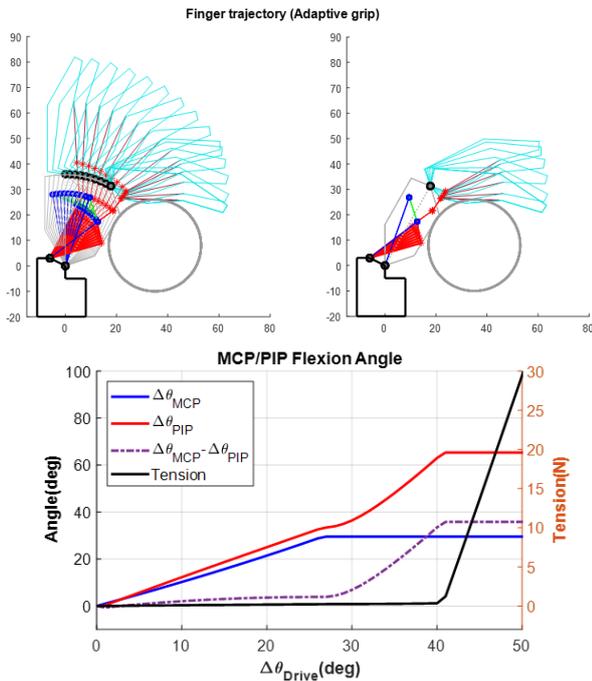
[Fig. 6]은 비접촉 상태에서의 파지 궤적과 이때의 구동링크 회전각도 θ_{MCP} , θ_{PIP} 를 나타낸 것이다. 결과에 따르면 θ_{MCP} 가 0°~90° 움직이는 동안 θ_{PIP} 도 0°~90° 움직이며 최종적으로 주먹을 쥘 자세까지 구현 가능한 것을 확인할 수 있고, 이 과정 중 MCP와 PIP 관절이 약 1:1.04의 비율의 움직임을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 적응형 파지 동작

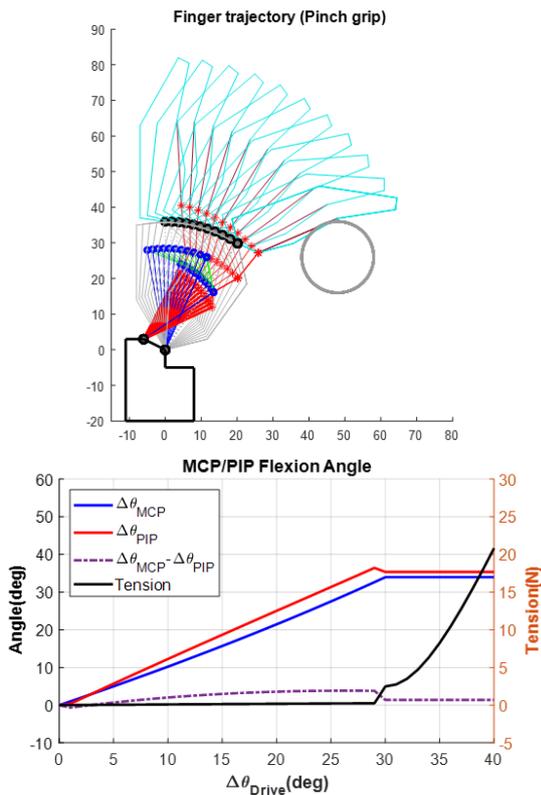
[Fig. 7]는 원형 물체에 대한 적응형 파지 궤적을 시뮬레이션 한 것이다. 파지 궤적의 왼쪽은 적응형 파지가 이뤄지는 동안의 전체 파지 궤적이고 오른쪽은 기절골이 물체와 접촉한 이후의 움직임만 나타낸 것이다. 파지 궤적을 보면 물체와 접촉 이전에는 비접촉 상태와 동일한 궤적으로 움직이다 기절골 링크가 물체와 접촉한 이후에는 기절골의 자세는 고정되고 구동링크에 의한 움직임이 모두 PIP의 움직임으로 전환되는 것을 알 수 있다.



[Fig. 6] Finger trajectory and Joint angles of phalanges during caging motion



[Fig. 7] Finger trajectory and Joint angles of phalanges during self-adaptive grip motion



[Fig. 8] Finger trajectory and Joint angles of phalanges during fingertip pinch grip motion

[Fig. 7]의 그래프는 각 관절의 각도와 와이어 장력을 나타낸 것으로 와이어의 장력은 적응형 파지가 완전히 이뤄지기 이전에는 미미한 수준으로 PIP 관절의 회전 각도에 비례하여 토션 스프링이 압축된 크기와 비례하며 파지가 완전히 이뤄진 이후에는 SEA 스프링 압축과 함께 와이어의 장력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.3 손끝 잡기 동작

[Fig. 8]은 손끝 잡기 동작이 이뤄지는 경우를 파지 궤적과 장력을 시뮬레이션 한 것이다.

손끝 잡기 동작의 경우 기본적으로 비접촉 상태의 파지 궤적을 따라다가 중절골 링크가 물체와 접촉하면 추가적인 움직임은 이뤄지지 않으며 SEA 스프링 압축에 의한 장력의 상승만 발생하는 모습을 볼 수 있다. 다만 이 실험의 결과는 손가락과 물체의 접촉점에서 미끄러짐이 없다는 조건에서의 시뮬레이션으로 실제의 경우는 장력이 상승함에 따라 MCP 관절에서는 약간의 신전과 PIP 관절에서는 약간의 굴곡이 추가적으로 발생하는 실제 사람의 손동작에서 과신전과 유사한 동작이 발생할 수 있다. 이는 시제품을 이용한 추가적인 검증을 수행한다.

5. 시제품 성능 실험

5.1 시제품 파지 성능 실험

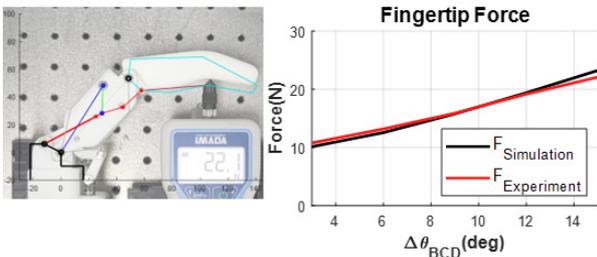
시뮬레이션 결과를 실증하기 위하여 3D프린터를 이용한 시제품을 제작하였다. 시제품의 말절골 및 중절골 링크 길이 및 두께는 센서 부착을 위해 시뮬레이션에서 사용한 크기의 2배로 제작되었다. 구동기는 120 N, 4 mm/s의 성능을 가진 선형 구동기(LM2038A, 모터뱅크, 대한민국)를 사용하여 구동부를 구성하였고 파트별 연동을 위한 와이어는 최대 50 kg의 인장 강도를 가진 0.5 mm 두께 Dyneema 와이어를 사용하였다.

제한한 손가락 메커니즘의 파지 성능을 검증을 위하여 최대 구동 각도 및 파지 궤적 검증 실험과 다양한 물체에 대한 파지 성능 실험을 수행하였다.

[Fig. 9(a)]~[Fig. 9(c)]는 제안한 손가락 메커니즘에 의한 케이징 동작 모습이다. 기절골과 중절골의 굴고 각도는 시뮬레이션 결과와 동일하게 선형적으로 연동하여 자연스러운 케이징 동작을 보였다. 그리고 완전히 구동하였을 때는 설계한 리미터까지 구동되는 결과를 보였다. [Fig. 9(d)]~[Fig. 9(g)]는 다양한 물체에 대한 파지 성능을 실험한 결과를 보여준다. 원통형 물체와 박스형 물체 및 지면에서 쉽게 구를 수 있는 물체에



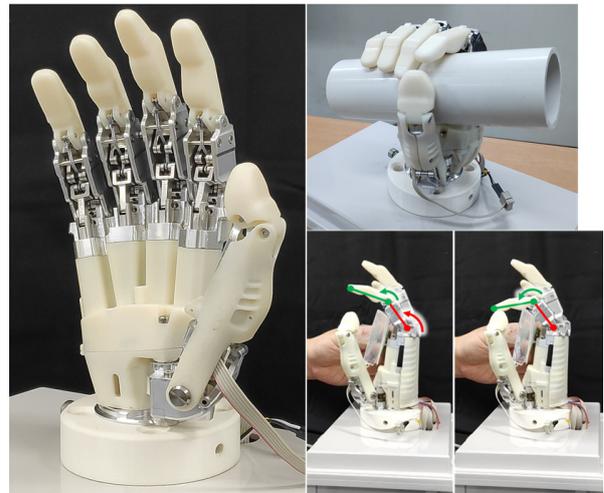
[Fig. 9] Gripping performance experiment, (a)~(c) Caging motion test, (d)~(g) Adaptive grip test, (h)~(i) Pinch grip test



[Fig. 10] Comparison of gripping force between simulation and prototype

대한 파지 성능을 검증하였고 각 경우에서 성공적으로 형상적응형 파지가 이뤄지는 것을 검증하였다. [Fig. 9(h)]~[Fig. 9(i)]는 손끝 집기 동작에 대한 성능 검증으로 안정적인 손끝 집기 성능 및 장력 상승 시에도 자세가 유지되는 결과를 보였다.

또한, 시제품의 파지력 성능 검증을 위해 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 파지력은 동일한 손끝 집기 자세에서 구동링크의 회전각을 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 로 변화시켜 가며 푸쉬풀 게이지를 이용하여 파지력을 측정하였다. [Fig. 10]은 실험에 사용된 자세 및 실험결과를 나타낸 것으로 실험 결과에 따르면 시제품의 파지력은 시뮬레이션과 거의 동일한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 이때 구동 와이어의 장력 대비 파지력의 변환 비율을 약 22% 정도로 이는 손가락이 가늘고 긴 형상을 가지고 있어 구동 와이어의 모멘트암이 파지 시 외력이 작용하는 모멘트암이 짧기 때문에 자세에 따라 20%~24% 정도의 효율을 보인다. 또한 파지력의 절대치 및 구동링크의 회전각에 따른 파지력



[Fig. 11] Under-actuated Robotic hand for self-adaptive grip and caging grasp

변화량은 SEA 스프링의 강성에 따라 조절이 가능한 시스템으로 고강성의 스프링을 사용할수록 강한 파지력이 구현 가능하며 저강성의 스프링을 사용할수록 정교한 파지력 제어가 가능한 특성을 가진다.

5.2 로봇 의수 제작

시제품을 이용한 파지 성능 실험 결과 시뮬레이션과 동일한 파지 궤적이 구현되는 것을 확인하였으며 다양한 형상과 크기를 가진 물체에 대하여 안정적인 잡기와 집기 동작이 가능한 것을 검증하였다.

이 결과를 바탕으로 제안한 손가락 메커니즘을 이용한 실제 사람의 손 크기와 동일한 규격의 로봇 의수를 제작하였다 [Fig. 11]. 제작된 로봇 의수는 총 6개의 구동기를 가지고(굽힘, 신전을 위한 구동기 각 손가락별 1개, 엄지손가락 내전, 외전을 위한 구동기 1개) 직경 약 12 cm의 물체까지 파지 가능하여 일상생활 중 대부분 물체를 잡는 것이 가능하다. 무게는 530 g으로 일반적인 상용 로봇 의수와 유사한 무게를 가지나 이는 향후 카본 소재와 같은 소재 개선을 통해 보다 경량화가 가능할 것으로 예상된다.

6. 결 론

본 연구에서는 4절 링크 메커니즘과 와이어 구동 메커니즘의 결합을 통해 자연스러운 케이징 파지 구현 및 적응형 파지, 손끝 잡기가 모두 가능한 손가락 부족구동 메커니즘을 제안하였고 시뮬레이션과 시제품을 이용한 실험을 통해 다양한 물체에 대한 안정적인 파지가 가능함을 검증하였다.

제안된 부족구동 메커니즘은 이중 링크지 체인을 이용하여 케이징 파지와 형상적응형 파지를 함께 구현하는 기존 메커니즘에 비해 단순한 구성요소를 가져 높은 경량성과 내구성을 가지며 관절별 강성 조절을 통해 두 가지 특성을 구현하는 기존 와이어 구동 기반의 손가락 메커니즘에 비해 외부 환경조건에 강인하며 높은 반복구동 신뢰성을 가져 보다 실용성 높은 로봇 의수 개발에 활용될 가능성을 지녔다. 다만 현재 로봇 의수는 시스템 경량화를 위해 말절골이 분리되어 있지 않은 구조를 사용하고 있어 얇은 판형의 물체 파지 시 파지 효율이 떨어지는 한계점을 가지고 있어 향후에는 이를 개선하기 위한 손가락 구조개선을 수행하고자 한다.

References

- [1] 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, Jun., 1989, DOI: 10.1109/70.34763.
- [2] T. Feix, J. Romero, H.-B. Schmedtmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic, "The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 66-77, Feb., 2016, DOI: 10.1109/THMS.2015.2470657.
- [3] S. Song and W. Zhang, "Grasp analysis and a self-adaptive robotic hand with a novel parallel-coupled switchable mode," *2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 2016, pp. 530-535, DOI: 10.1109/ICARM.2016.7606976.
- [4] J. T. Belter, J. L. Segil, A. M. Dollar, and R. F. Weir, "Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review," *JRRD*, vol. 50, no. 5, pp. 599, 2013, DOI: 10.1682/JRRD.2011.10.0188.
- [5] A. M. Dollar, "Classifying Human Hand Use and the Activities of Daily Living," *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, vol. 95, R. Balasubramanian and V. J. Santos, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 201-216, DOI: 10.1007/978-3-319-03017-3_10.
- [6] D. Hirano, K. Nagaoka, and K. Yoshida, "Design of under-actuated hand for caging-based grasping of free-flying object," *2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Kobe, Japan, Dec., 2013, pp. 436-442, DOI: 10.1109/SII.2013.6776675.
- [7] E. N. G. Melo, O. F. A. Sánchez, and D. A. Hurtado, "Anthropomorphic robotic hands: a review," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 279-313, Jun., 2014, DOI: 10.14482/inde.32.2.4715.
- [8] P. Rea, "On the Design of Underactuated Finger Mechanisms for Robotic Hands," *Advances in Mechatronics*, H. Martínez-Alfaro, Ed. InTech, 2011, DOI: 10.5772/24304.
- [9] B. Rubinger, M. Brousseau, J. Lymer, C. Gosselin, and T. Laliberte, "A novel robotic hand-SARAH for operations on the International Space Station," *ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*, 2002, [Online], <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Novel-Robotic-Hand-SARAH-For-Operations-on-the-Rubinger-Brousseau/d5bee755dae6284d921dd6c552166739715ae226>.
- [10] G. Palli, C. Melchiorri, G. Vassura, U. Scarcia, L. Moriello, G. Berselli, A. Cavallo, G. De Maria, C. Natale, S. Pirozzi, C. May, F. Ficuciello, and B. Siciliano, "The DEXMART hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 5, pp. 799-824, Apr., 2014, DOI: 10.1177/0278364913519897.
- [11] W. Zhang, D. Zhao, H. Zhou, Z. Sun, D. Du, and Q. Chen, "Two-Dof Coupled And Self-Adaptive (Cosa) Finger: A Novel Under-Actuated Mechanism," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 10, no. 2, Jun., 2013, DOI: 10.1142/S0219843613300018.
- [12] D. Yoon, G. Lee, S. Lee, and Y. Choi, "Underactuated finger mechanism for natural motion and self-adaptive grasping towards bionic partial hand," *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Singapore, 2016, DOI: 10.1109/BIOROB.2016.7523683.
- [13] R. Rätz, F. Conti, R. M. Müri, and L. Marchal-Crespo, "A Novel Clinical-Driven Design for Robotic Hand Rehabilitation: Combining Sensory Training, Effortless Setup, and Large Range of Motion in a Palmar Device," *Frontiers in Neurobotics*, vol. 15, Dec., 2021, DOI: 10.3389/fnbot.2021.748196.



신민기

2010 서울대학교 기계항공공학부 졸업
(공학사)
2017 서울대학교 기계공학 석박사 통합과정
졸업(공학박사)
2018~현재 한국기계연구원 선임연구원

관심분야: 재활로봇, 웨어러블 로봇, 소프트 로봇



우현수

2000 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2002 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
2009 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2010~현재 한국기계연구원 책임연구원

관심분야: 수술/재활로봇, 인간증진로봇, 로봇 매니플레이터



조장호

2002 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2004 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
2010 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2013~현재 한국기계연구원 선임연구원

관심분야: 원격/햅틱/시간지연제어, 의료 로봇



김기영

2003 한국과학기술원 기계공학과(공학사)
2005 한국과학기술원 기계공학과(공학석사)
2012 한국과학기술원 기계공학과(공학박사)
2016~현재 한국기계연구원 선임연구원

관심분야: 수술로봇, 연속체 로봇, 텐던 로봇 메커니즘