

기능형 의수를 위한 텐스그리티 관절 구조 기반의 유연하고 가벼운 로봇 핸드 개발

Development of Flexible and Lightweight Robotic Hand with Tensegrity-Based Joint Structure for Functional Prosthesis

이 건¹, 최 영 진[†]

Geon Lee¹, Youngjin Choi[†]

Abstract: This paper presents an under-actuated robotic hand inspired by the ligamentous structure of the human hand for a prosthetic application. The joint mechanisms are based on the concept of a tensegrity structure formed by elastic strings. These rigid bodies and elastic strings in the mechanism emulate the phalanx bones and primary ligaments found in human finger joints. As a result, the proposed hand inherently possesses compliant characteristics, ensuring robust adaptability during grasping and when interacting with physical environments. For the practical implementation of the tensegrity-based joint mechanism, we detail the installation of the strings and the routing of the driving tendon, which are related to extension and flexion, respectively. Additionally, we have designed the palm structure of the proposed hand to facilitate opposition and tripod grips between the fingers and thumb, taking into account the transverse arch of the human palm. In conclusion, we tested a prototype of the proposed hand to evaluate its motion and grasping capabilities.

Keywords: Prosthetic Hand, Tensegrity Structure, Bio-inspired Design, Flexible Hand

1. 서 론

인간의 손은 일상 생활 활동에 있어서 다양한 작업을 수행하거나 의사를 표현하는데 있어서 매우 중요한 기능을 수행한다. 하지만 불의의 사고로 인해 손을 상실하거나 기능적인 문제로 사용에 제한이 있는 사람은 일상 생활 활동을 수행하는데 다양한 어려움을 겪는다. 이러한 문제를 해결하고 손의 사용이 어려운 사람들의 삶의 질을 향상시키기 위해 의수에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 의수 기술은 점점 더 발전하고 있다.

최근 의료기기 산업의 발전과 인공지능 기술의 도입으로 의수는 사용자의 의도를 좀 더 정확하게 파악하고 사용자의

움직임을 더욱 자연스럽게 모방할 수 있게 되었다. 의수는 다양한 센서와 알고리즘을 통해 사용자의 근육 신호를 감지하고 해석하여 의도된 움직임으로 변환한다. 이러한 기술의 발전은 의수 사용자들은 더욱 자유롭고 독립적으로 일상 생활을 수행할 수 있게 도와준다¹⁻³.

하지만 이러한 발전되는 인터페이스에도 불구하고 아직 의수의 핸드 메커니즘에는 많은 한계가 존재한다. 로봇 핸드와는 다르게 의수는 그 크기와 구동기의 적재에 있어서 많은 제약이 따르며, 사용자의 사용 피로도를 줄이기 위해 무게 또한 가벼워야 한다. 이러한 이유에서 의수는 로봇 핸드와 비교해서 많은 자유도로 구동이 불가능하며, 이에 따라 섬세한 동작이 어렵다는 한계를 갖는다. 다만, 의수의 경우 부족한 자유도로 다양한 물체의 파지를 위해 수동 관절의 사용이 보편화되어 있으며 효율적인 메커니즘을 위해 부족 구동 방식(Under-actuation)으로 동작하는 것이 대부분이다⁴⁻¹⁰.

의수의 주된 목적은 손을 상실한 사람에게 일상 생활 활동을 수행하는데 도움을 주기 위해 착용 편의성 및 다양한 방법

Received : Aug. 7. 2023; Revised : Nov. 9. 2023; Accepted : Nov. 22. 2023

※ This paper was supported by Education and Research promotion program of KOREATECH in 2023

1. Assistant Professor, KOREATECH, Cheonan, Korea (geonlee@koreatech.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Department of Robot Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea (cyj@hanyang.ac.kr)

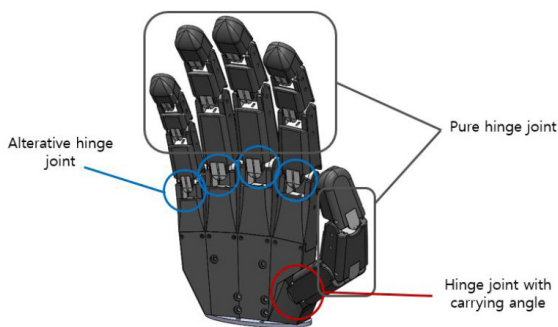
의 파지를 주된 목적으로 한다. 이를 위해 의수 핸드 메커니즘은 경량화와 다양한 물체의 안정적인 파지를 목표로 개발되어 왔으며, 기능성과 편의성의 타협을 위해 가능한 적은 개수의 구동기로 많은 유형의 파지를 구현하는 연구가 진행되었다^[8,9,11]. 또한, 실용성을 위해 메커니즘의 내구성도 중요한 요소중의 하나이다. 내구성에 있어서 의수 메커니즘 자체의 동작에 대한 내구성도 중요하지만 자가 충돌 또는 외부 충격에 대한 내구성 역시 중요한 부분이다.

본 논문에서는 위에서 언급한 여러 조건을 만족하는 의수를 개발하기 위해 텐스그리티 기반 관절 구조의 의수를 제안한다. 텐스그리티는 강체와 탄성을 갖는 스트링으로 구성되는 구조체로 공간의 모든 방향으로의 유연성을 가지며, 탄성 스트링의 장력이 무거운 강체의 강성을 대신할 수 있기 때문에 중량을 경량화 할 수 있다는 장점이 있다^[12].

[13]에서는 인체의 뼈와 인대 구조 모사를 통해 텐스그리티 구조를 간단하게 구현하여 내재적으로 유연성을 갖고, 경량화가 가능한 관절 구조에 대해 소개하였다. 본 논문에서는 이러한 관절 구조를 이용하여 핸드 메커니즘을 구성하는 방법과 텐스그리티 기반 관절 구조를 이용한 실질적인 메커니즘 구현을 위해 핸드의 움직임과 관련된 구동 텐션과 경로에 대해 자세히 설명한다. 또한 시작품을 이용한 파지 능력 실험을 통해 제한하는 핸드 메커니즘을 평가한다.

2. 텐스그리티 구조 기반의 손가락 관절 구조

본 논문에서는 세 개의 다른 기능의 경첩 관절을 활용하여 의수 메커니즘을 구현을 하였다. 모든 관절은 동일 구조의 텐스그리티 구조를 기반으로 스트링의 고정 위치에 따른 다른 움직임의 구현 방법을 이용하였다. [Fig. 1]은 제안하는 핸드 메커니즘에 사용된 텐스그리티 관절 배치를 도식화한 것이다.



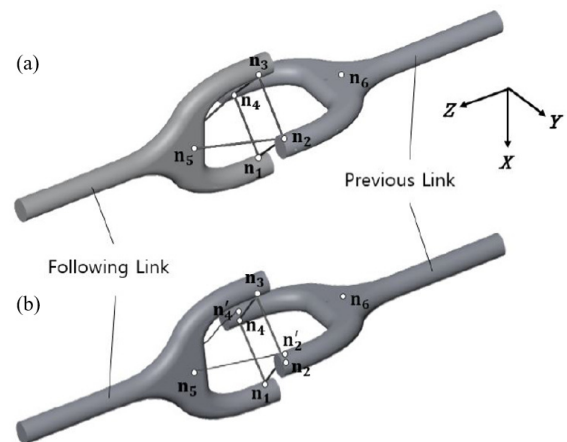
[Fig. 1] Proposed hand mechanism: three types of hinge joints are used, where pure hinge joints are used in IP joints, alternative hinge joints are used in MCP joints, and hinge joint with carrying angle is used in CMC joint

2.1 수지절간(IP) 관절과 중수지(MCP) 관절

인체의 수지절간 관절(DIP/PIP joint)은 기계적으로 경첩 관절로 간주된다. 단순히 물체를 안정적으로 감싸 쥐기 위한 신전과 굴절 운동 수행을 담당한다. 반면에 중수지 관절의 경우 기계적으로 2자유도 관절로 간주된다. 수지절간 관절과 같이 신전과 굴절 운동이 가능하며 펌과 모음의 운동이 가능하여 물체의 크기에 따라 손가락을 넓게 또는 좁게 하여 안정적인 파지를 가능하게 한다. 중수지 관절의 흥미로운 점은 신전시에 2자유도 운동이 가능하지만 관절이 굴절됨에 따라 1자유도 관절로 변화한다는 것이다. 실제 이러한 현상은 중수지 관절의 인대 구조에 의해 나타나는 현상이며 이러한 기능은 물체를 단단히 쥘 경우 양쪽으로는 흔들림을 줄여주며 물체를 견고히 잡는 것을 가능하게 해준다. 이러한 중수지 관절의 잡는데 도움을 준다. 중수지 관절의 자유도 변화는 물체 형상에 유연하게 대처하여 물체를 잡는 것을 가능하게 해주며 도구 등을 견고히 잡고 사용하는 것을 가능하게 해주는 중요한 기능이다.

위와 같은 손가락을 구성하는 두 개의 다른 형태의 관절은 [Fig. 2]에서와 같이 [13]에서 제안하는 텐스그리티 구조 기반의 순수 경첩 관절과 변동 경첩 관절로 구현하였다. 순수 경첩 관절의 경우 텐스그리티 구조를 이루는 스트링이 모두 같은 장력으로 구성되어 있어 관절의 회전에 따라 같은 회전 중심을 갖는다. 반면 변동 경첩 관절의 경우 장축(Z축)으로 연결되는 한 쌍의 스트링이 나머지 스트링에 비해 상대적으로 약한 장력으로 회전 중심 뒤쪽(n_2, n_4)에 연결되어 있으며 관절의 회전에 따라 이 한 쌍의 스트링의 장력이 증가하게 된다. 이러한 현상은 관절이 펴졌을 때는 상대적으로 약한 장력 쪽으로의 움직임이 수월하며 굽혀졌을 때에는 장력이 증가하여 움직임을 저항하게 해주는 현상을 발생한다.

또한, 텐스그리티 기반의 관절은 회전 방향 이외로의 방향



[Fig. 2] Two types of tensegrity-based joints^[13]: (a) pure hinge joint; (b) alternative hinge joint

으로도 스트링의 장력에 의해 외력에 의한 움직임 가지며 이러한 움직임은 다양한 모양의 물체의 파지에 있어서 물체의 면에 최대한 평행하게 마디를 위치하게 도와주어 안정적인 파지를 가능하게 한다. 본 논문에서는 [14]에서 제시된 방법을 이용하여 관절이 회전함에 따라 복원력을 발생하게 하여 단방향 구동 텐던(Driving tendon)으로 손가락의 신전과 굴절 운동을 가능하게 하였다.

2.2 엄지 손목손허리(CMC) 관절

엄지의 손목손허리 관절은 안장 모양의 관절로 신전과 굴절, 폼과 모음 그리고 미소한 장축 회전을 허용한다. 이러한 움직임을 구현하기 위해 로봇 핸드 설계에서는 일반적으로 직교하는 2자유도의 구조로 설계를 하며, 이 움직임은 로봇 손의 섬세한 조작 능력과 밀접하게 관련되어 있어 설계에 있어서 매우 중요한 부분이다.

하지만 이러한 2자유도로의 손목손허리 관절 설계는 의수 메커니즘에 있어서 구동기 적재 공간과 구동기로 인한 무게 증

가 등의 문제로 인해 실현하기 어려운 부분이다. 따라서, 대부분의 의수는 손목손허리 관절을 단일자유도로 구현을 하거나 폼과 모음 동작을 수동으로 조작 할 수 있게 설계하기도 한다.

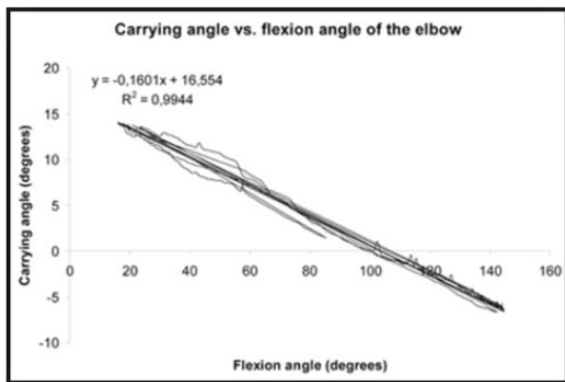
[Fig. 3(b)]는 엄지 손목손허리 관절의 기능적 결합을 보여 준다. 기능적 결합은 물체를 잡거나 병 뚜껑을 돌려서 여는 등 일상생활 활동(ADL)에서 자주 사용되는 손의 움직임에서 엄지 손목손허리 관절의 신전 및 굴절, 폼과 모음의 움직임의 관계를 나타내며 서로 선형적인 관계를 갖는 특징이 있다. 여기서 흥미로운 점은 [Fig. 3(a)]의 상완골 관절의 운반 각도(Carrying angle)과 손목손허리 관절의 기능적 운동 결합이 유사한 선형적인 경향을 보여준다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 제안하고자 하는 의수의 손목손허리 관절은 [13]에서 제안하는 운반 각도를 갖는 경첩 관절로 구현하였다. 이러한 구현 전략을 통해 구동기 수를 감소시켜 의수의 무게를 줄일 뿐만 아니라 의수의 물체 조작 능력에도 이점을 갖게 하였다.

3. 로봇 의수 개발

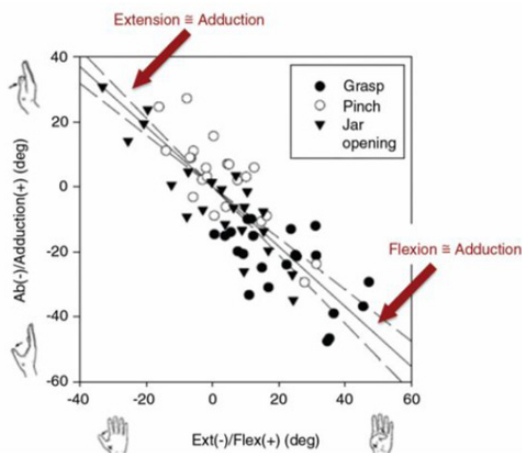
본 장에서는 텐스그리티 기반의 관절 메커니즘을 실제로 구현하기 위한 구조적 스트링 설치 방법을 제안하고 이를 이용하여 로봇 손가락 메커니즘을 개발한다. 또한 로봇 손가락을 구동하기 위한 로봇 손 내부의 구동기 배치와 좀더 안정적인 물체 파지를 위한 인간과 유사한 손바닥 아치(Palm Arch)를 구현한다.

3.1 손가락 메커니즘 구조

[Fig. 4]의 상단은 제안된 텐스그리티 관절 메커니즘을 기반

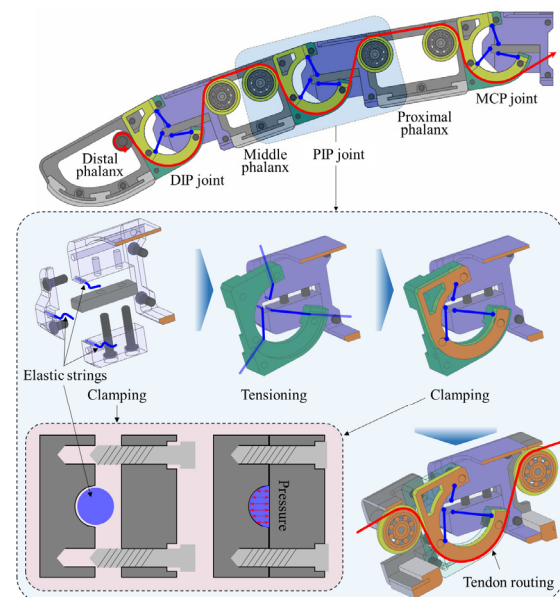


(a)



(b)

[Fig. 3] (a) Carrying angle of the humeroulnar joint in the elbow complex^[15]. (b) Functional coupling if the CMC joint^[16]



[Fig. 4] Finger mechanism and tensegrity construction

으로 개발된 손가락 메커니즘의 단면도를 나타낸다. 인간과 동일한 세 개의 마디를 지니도록 개발하였으며, 기본적인 관절 구조는 [14]에서 제시한 텐스그리티 구조를 기반으로 하였다. 각 관절은 텐스그리티 관절을 구성하는 스트링의 정적 평형에 의해 인접한 두 마디가 서로 비접촉 상태를 유지하여 마디를 구성하는 강체 간에 접촉은 발생하지 않는다. 손가락 관절을 구성하는 텐스그리티 관절은 그 크기가 매우 작아 스프링과 같은 소자 사용이 불가능하여 우레탄 줄을 사용하여 구성하였다. 손가락의 구동을 위해 하나의 구동 텐던이 사용되며, 구동 텐던은 손가락 말단에 고정되어 세 개의 텐스그리티 관절을 경유한다. 이 때, 텐던의 장력에 의해 텐스그리티 관절이 회전 운동을 갖도록 하기 위하여 모든 마디의 기저부는 원의 일부인 C-형상으로 제작되어 텐던이 감기도록 개발하였다.

스트링의 정적 평형으로 구현되는 텐스그리티 메커니즘은 스트링의 양단을 각각 인접한 두 마디에 장력을 유지한 상태에서 안정적으로 고정하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서는 스트링 고정을 위해 클램핑(Clamping) 방식을 채택하였다. [Fig. 4]의 하단은 텐스그리티 기반의 관절 메커니즘에 스트링을 조립하는 과정을 보여주는 단면도이며, 동일한 구성이 대칭으로 배치되어 있다. 플레이트(Plate)의 반구 홈에 스트링을 삽입하고 고정부(Fixture)의 벽면으로 스트링을 압착하여 고정시킨다. 이러한 방법은 다소 복잡한 형상의 단일 강체 구조물을 부분화하여 메커니즘의 조립성을 향상시킬 수 있다. 또한 클램프의 플레이트와 고정부가 스트링을 둘러싸며 고르게 면 압력을 가함으로써 집중 하중에 의한 단선을 방지할 수 있다. 이후, 인위적인 장력을 유지한 상태에서 동일한 방식으로 나머지 스트링의 말단을 클램핑하여 텐스그리티 관절을 구현하였다. 손가락 메커니즘의 모든 텐스그리티 관절은 각 손가락에 상응하는 다른 크기의 동일한 부품 형상과 방식으로 개발되었으며, 각 손가락의 무게에 따라 스트링의 장력을 달리 하여 각기 다른 마디의 관절에 사용하였다.

3.2 손바닥 구조

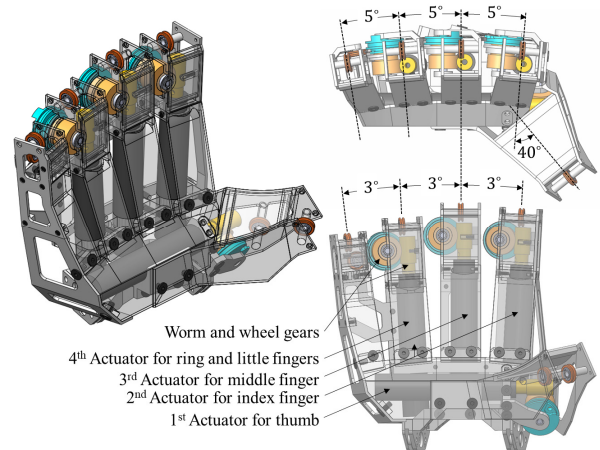
개발된 로봇 의수는 엄지를 포함하여 다섯 개의 손가락 메커니즘을 지니고 있으며, 총 네 개의 구동기가 사용된다. 삼점 파지(Tripod grip)를 구성하는 엄지, 검지, 중지 독립적인 구동 능력을 부여함으로써 주요 파지 동작에 관여하도록 개발하였다. 이와는 다르게, 상대적으로 파지의 안정성에 관여하는 소지와 약지는 각각의 구동 텐던을 하나의 스펀(Spool)에 동시에 감기도록 하여, 하나의 구동기로 굴절 및 신전 되도록 하여 구동기의 개수를 줄임으로써 로봇 핸드의 부피와 무게를 감소시키고자 하였다.

[Fig. 5]은 개발된 로봇 의수의 손바닥 구조를 나타낸다. 사

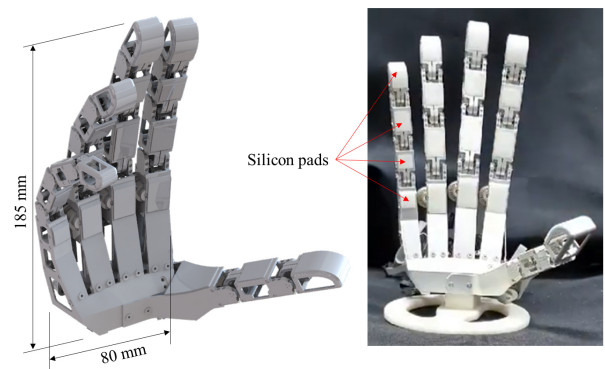
용된 모든 구동기를 손바닥에 손가락 메커니즘의 길이 방향으로 배치하여 뼈대를 구성하고, 워 휠에 스펀을 고정하여 회전함으로써 손가락 메커니즘의 텐던 구동이 가능하도록 개발하였다. 또한 인간의 네 손가락은 손바닥의 아치 형상을 이루도록 배치하여 각각의 손가락은 엄지와 맞섬(Opposition)이 가능하게 하였다. 이러한 손바닥의 아치 형상을 구현하기 위해, [Fig. 5]과 같이 개발된 각각의 손가락 메커니즘은 길이 방향으로 5°의 상대적인 각도를 가지고 3°의 손가락 외전(Abduction)을 갖도록 배치하였다. 또한 엄지 메커니즘을 검지를 기준으로 40°의 상대 각도로 대립 배치시킴으로써 삼점 파지가 가능하도록 개발하였다.

3.3 로봇 의수 시연

[Fig. 6]은 제작 및 조립된 로봇 의수의 시작품을 나타낸다. 손가락 마디의 바닥면에는 실리콘 패드를 배치하여 마찰력을 증가시켜 물체 파지에 유리하도록 개발하였다. 구동기를 포함한 전체 무게는 320 g이며, 검지 메커니즘을 기준으로 최대 높



[Fig. 5] Palm construction for actuation and human-like palm arch



[Fig. 6] Rendered design and fabricated prototype of prosthetic tenoscopy hand

이 185 mm, 소지에서 검지 메커니즘까지 폭 80 mm를 갖는다.

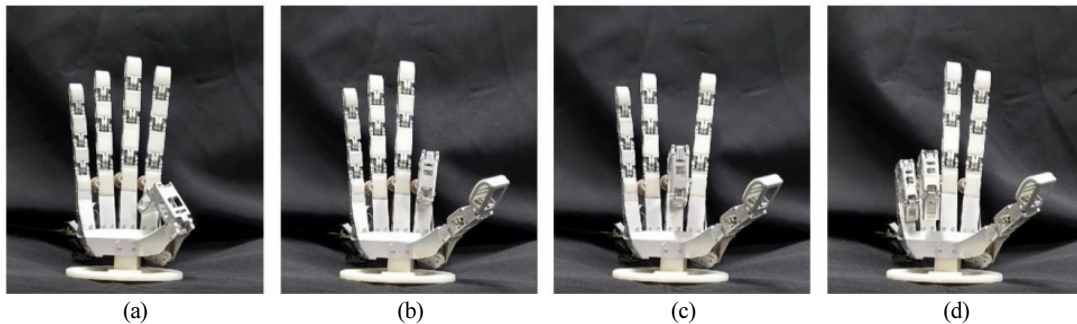
[Fig. 7]는 각 구동기에 의해 동작되는 로봇 의수의 시작품을 보여준다. (a)엄지, (b)검지, (c)중지는 각각의 구동기에 의해 독립적으로 동작함으로써 굴절 및 신전이 가능함을 보이며, 약지와 소지는 하나의 모터에 종속되어 동시에 굴절 및 신전을 보인다. 각 손가락 메커니즘은 단일 방향의 텐던 부족구동 방식으로 인해, 굴절을 일으키며, 텐스그리티 구조 관절의 스트링 탄성 복원력에 의해 손가락 메커니즘이 신전된다. 또한 [Fig. 8]에서와 같이 부족구동 방식으로 인하여 다양한 외형상의 물체를 안정적으로 견고하게 파지하는 모습을 보여준다. 특히, 물체의 파지가 완료된 상태에서 손가락 메커니즘은 각기 다른 다양한 자세를 갖게 되는데, 이는 손가락을 구성하는 텐스그리티 관절의 내재적인 유연성으로부터 기인하는 것으로 외부 환경에 적응하여 관절에 추가적인 동작 없이도 물체를 잡을 수 있다는 것을 보여준다. 또한, [Fig. 8] (a)와 (b)에서와 같이 특정 물체를 파지 할 때, 한 손가락이 다른 손가락 위로 압력을 가하거나 (c)에서와 같이 두 손가락이 서로 접촉하는 경우가 빈번히 발생할 수 있다. 이는 일반적인 경첩 관절(Hinge joint)로 이루어진 로봇 핸드에서는 물체 파지를 실패하게 만드는 요인이 되거나 고장의 원인이 될 수 있으나, 텐스그리티 기반의 관절 메커니즘의 유연성으로 인하여 서로를 손상시키는 것 없이 물체를 안정적으로 파지할 수 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

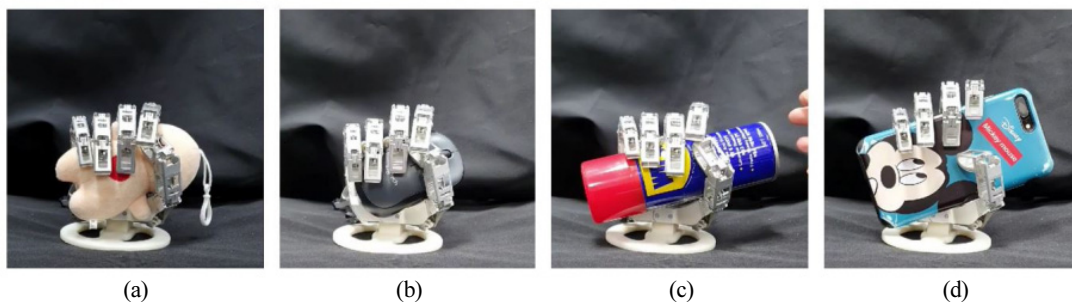
본 논문에서는 텐스그리티 구조를 활용하여 자가 적응형 파지가 가능한 의수 메커니즘을 제안하였다. 제안한 의수는 텐스그리티 구조가 갖는 내재적 유연성에 의해 손가락이 서로 접촉될 수 있는 상황에서도 손상 없이 안정적으로 다양한 모양의 물체의 파지가 가능하다. 더 나아가서는 사람의 신체와 부딪히거나 외부 환경과의 부딪힘으로 발생할 수 있는 충격으로부터 의수의 손상을 줄일 수 있으며, 텐스그리티 구조의 특성 상 가벼운 무게의 메커니즘 구현이 가능하다.

[Table 1]은 제안하는 의수와 현존하는 의수를 몇 가지 요소를 기준으로 비교한 표이다. 의수 개발에 있어서 중요한 지표인 물체 파지 능력과 무게와 관련된 요소를 위주로 비교를 하였으며, 어느 것이 더 우수한 의수인가를 논의하기 위한 것은 아니다. 다만, 본 논문에서 제안하는 새로운 관절 형태의 핸드 메커니즘이 기계화된 다른 의수 핸드와 비교해서 의수로의 역할을 수행하기 위해 기능적으로나 자유도 측면에서 부족하지 않다는 것을 확인할 수 있다.

제안하는 의수 메커니즘을 구성하는 텐스그리티 구조 관절은 기계가 아닌 손으로 직접 당겨서 제작하였기 때문에 텐스그리티 구조를 이루는 스트링의 장력이 일정하지 못하다는 한계점이 존재한다. 손가락의 접촉 힘은 구동 텐던의 당기는 힘



[Fig. 7] Finger drive in prosthetic tensegrity hand: (a) thumb, (b) index finger, and (c) middle finger are individually actuated by each single motor, while (d) ring and little fingers are actuated simultaneously by only one motor



[Fig. 8] Grasping test of prosthetic hand: a total of four different shaped objects, which are (a) atypical object, (b) mouse, (c) cylindrical object, and (d) cell phone, were attempted to grasping

[Table 1] Comparison of the designs and functions of hand mechanisms for prosthesis

Model Developer	Actuation (location)	DOF	Compliance	Abduction/Adduction	Joint type	Purpose
OLYPIC ^[4] Imperial College London	DC motors with bevel gears and tendons (palm)	3 DOA	No	Impossible	Pin joint	For hand prosthesis
HIT V ^[5] Harbin Institute of Technology	DC motors with worm gears and tendons (finger)	2 DOA	No	Impossible	Pin joint	For hand prosthesis
Galileo ^[6] Galileo Univ.	DC motors with tendons (palm)	3 DOA	No	Impossible	Pin joint	For hand prosthesis
OpenBionics ^[7] National Technical Univ. of Athens	Servo motor with tendons (palm)	3 DOA	Yes	Impossible	Flexible plate	For partial hand prosthesis
I-Limb ^[8] Touch Bionics	DC motors with worm gears and belt (finger)	2 DOA	No	Impossible	Pin joint	For hand prosthesis
Sandia ^[9] Sandia National Laboratories	DC motors with tendons (finger)	2 DOA	No	Active	Pin joint	For partial hand prosthesis
Pisa/IIT Hand ^[10] Pias Univ. and Instituto Italiano de Tecnologia	DC motors with tendons (palm)	3 DOA	Yes	Passive	Rolling-Contact	For hand prosthesis
Proposed Hand	DC motors with worm gears and tendons (palm)	4 DOA	Yes	Passive	Tensegrity	For hand prosthesis

뿐만이 아니라 관절을 구성하는 스트링의 장력에도 영향을 받기 때문에 원하는 정확한 장력으로 스트링을 고정시킬 수 없는 점은 제안하는 메커니즘의 매우 큰 단점이다.

하지만 기존의 전통적인 기계소자를 이용한 방식이 아닌 새로운 구조 방식으로서의 의수 설계로 기존 의수들이 수행할 수 있는 물체 파지를 보여준 것은 의미를 갖는다. 더 나아가 텐스그리티 구조가 갖는 특성에 의한 제안한 의수의 유연성과 가벼운 무게는 다른 의수와 비교해서 큰 장점을 갖는 것으로 판단된다. 또한 텐스그리티 구조를 응용하여 손가락 마디끼리 접촉하게 되는 상황도 고려한다면 관절의 강성을 가변할 수 있을 것으로 기대된다.

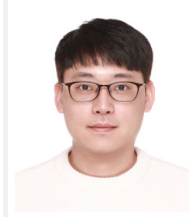
References

- [1] G. Kumar, S. S. Yadav, Yogita, and V. Pal, "Machine Learning-Based Framework to Predict Finger Movement for Prosthetic Hand," *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 1-4, Jun., 2022, DOI: 10.1109/LENS.2022.3147518.
- [2] Q. Luo, C. M. Niu, C. Chou, M. Hao, and N. Lan, "Evaluation of Model-Based Biomimetic Control of Prosthetic Finger Force for Grasp," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 29, pp. 1723-1733, 2021, DOI: 10.1109/TNSRE.2021.3106304.
- [3] M. Cheng, L. Jiang, S. Fan, B. Yang, J. Dai, and H. Liu, "Development of a Multisensory Underactuated Prosthetic Hand With Fully Integrated Electronics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 28, no. 2, pp. 1187-1198, Apr., 2023, DOI: 10.1109/TMECH.2022.3207107. 2023.
- [4] L. Liow, A. B. Clark, and N. Rojas, "OLYMPIC: A Modular, Tendon-Driven Prosthetic Hand With Novel Finger and Wrist Coupling Mechanisms," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 299-306, Apr., 2020, DOI: 10.1109/LRA.2019.2956636.
- [5] L. Jiang, B. Zeng, S. Fan, K. Sun, T. Zhang, and H. Liu, "A Modular Multisensory Prosthetic Hand," *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Hailar, China, pp. 648-653, 2014, DOI: 10.1109/ICInfA.2014.6932734.
- [6] J. Fajardo, V. Ferman, A. Lemus, and E. Rohmer, "An Affordable Open-Source Multifunctional Upper-Limb Prosthesis with Intrinsic Actuation," *2017 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, Austin, TX, USA, pp. 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ARSO.2017.8025206.
- [7] M. V. Liarokapis, A. G. Zisimatos, M. N. Bousiou, and K. J. Kyriakopoulos, "Open-Source, Low-Cost, Compliant, Modular, Underactuated Fingers: Towards Affordable Prostheses for Partial Hand Amputations," *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Chicago, IL, USA, pp. 2541-2544, 2014, DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944140.
- [8] Touch Bionics, Inc., Mansfield, MA, USA, 2019. [Online], www.touchbionics.com, Accessed: Dec. 22, 2023.
- [9] M. Quigley, C. Salisbury, A. Y. Ng, and J. K. Salisbury, "Mechatronic design of an integrated robotic hand," *The International*

Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 5, pp. 706-720, Feb., 2014, DOI: 10.1177/0278364913515032.

- [10] C. D. Santina, C. Piazza, G. Grioli, M. G. Catalano, and A. Bicchi, "Toward Dexterous Manipulation with Augmented Adaptive Synergies: The Pisa/IIT SoftHand 2," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 5, pp. 1141-1156, Oct., 2018, DOI: 10.1109/TRO.2018.2830407.
- [11] P. Wattanasiri, P. Tangpornprasert, and C. Virulsri, "Design of Multi-Grip Patterns Prosthetic Hand With Single Actuator," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 26, no. 6, pp. 1188-1198, Jun., 2018, DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2829152.
- [12] G. Lee, G. Y. Hong, and Y. Choi, "Tendon-driven Compliant Prosthetic Wrist Consisting of Three Rows Based on the Concept of Tensegrity Structure," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 3956-3963, Apr., 2021, DOI: 10.1109/LRA.2021.3067237.
- [13] G. Lee, D. Yoon, and Y. Choi, "Design of Compliant Hinge Joints inspired by Ligamentous Structure," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 14, no. 4, pp. 237-244, Nov., 2019, DOI: 10.7746/jkros.2019.14.4.237.
- [14] H. Son, G. Lee, C. Lee, and Y. Choi, "Underactuated Tendon-driven Finger Design with Bio-inspired Ligamentous Joint Mechanism," *2018 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, Shenzhen, China, pp. 171-176, 2018, DOI: 10.1109/CBS.2018.8612226.
- [15] M. L. Zampagni, D. Casino, S. Zaffagnini, A. Visani, and M. Marcacci, "Trend of the Carrying Angle During Flexion-Extension of the Elbow Joint: A Pilot Study," *Orthopedics*, vol. 31, no. 1, Jan., 2008, DOI: 10.3928/01477447-20080101-44.
- [16] A. L. Ladd, A. C. Weiss, J. J. Crisco, E. Hagert, J. M. Wolf, S. Z. Glickel, and J. Yao, "The Thumb Carpometacarpal Joint: Anatomy, Hormones, and Biomechanics," *Instructional Course Lectures*, vol. 62, pp. 165-179, 2013, [Online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23395023/>.

이 건



2008 한양대학교 전자전기공학과(공학사)
 2010 한양대학교 전자전기제어계측공학과 (공학석사)
 2020 한양대학교 전자시스템공학과 (공학박사)
 현재 한국기술교육대학교 조교수

관심분야: 생체모사, 메커니즘 설계, 로봇틱스

최 영 진



2002 POSTECH 기계공학과(공학박사)
 2005 KIST 지능로봇연구센터선임연구원
 현재 한양대학교 ERICA 로봇공학과 교수

관심분야: 로봇 제어, 생체신호처리