

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

박정환*·윤태환*·엄승환*·최혁렬**

*성균관대학교 기계공학부

Low-Cost Modular Multi-DOF Robotic Hand

Jeonghwan Park*, Taehwan Yoon*, Seunghwan Um* and Hyouk Ryeol Choi**

* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Key Words: Robotic Hand(로봇손), Multi-DOF(다자유도), Modular Design(모듈화 설계), Servo Motor(서보 모터), Link Mechanism(링크 메커니즘), Passive Adaptation(수동 적응), Low Cost(저비용)

초록: 고령화와 노동력 부족으로 인력을 대체할 자동화 시스템의 수요가 커지면서, 다양한 형상의 물체를 다룰 수 있는 다자유도 로봇손의 수요도 함께 증가하고 있다. 그러나 기존 상용 로봇손은 전용 구동기와 복잡한 구조로 인해 가격이 매우 높고 유지보수가 어려워 이러한 수요를 감당하기 어렵다. 본 설계는 인간 손과 유사한 크기를 유지하면서 시판 저가형 서보모터와 3D 프린팅만으로 제작 가능한 16 자유도 모듈화 로봇손을 제안한다. 서보모터를 손가락 내부에 재배치한 다이렉트 구동, 링크 연동과 패시브 손끝 적응 구조, 손가락 단위 교체 구조를 결합하여 크기, 비용, 유지보수성을 동시에 고려하였으며, 그 결과 다양한 크기의 물체를 파지할 수 있고 저렴한 비용으로 제작 가능함을 확인하였다.

Abstract: Due to aging and labor shortages, demand is growing for automation systems and multi-DOF robotic hands that handle objects of various shapes. However, commercial robotic hands are expensive and hard to maintain because of dedicated actuators and complex structures. This design proposes a modular 16-DOF robotic hand of human-hand size, built only with low-cost servo motors and 3D printing. Direct drive with servo motors rearranged inside the fingers, link-coupled joints with a passive fingertip, and replaceable finger modules address size, cost, and maintainability together. As a result, the hand grasps various objects at low cost.

1. 서론

고령화와 노동력 부족으로 산업 현장의 자동화 수요가 증가하면서, 다양한 형상의 물체를 잡고 조작할 수 있는 로봇 말단장치의 중요성이 커지고 있다. 로봇손(robotic hand)은 산업용 그리퍼에서부터 사람의 형태와 기능을 모사한 다자유도 의인화 로봇손까지 다양한 형태로 발전해 왔다.^(1,2) 사람의 손은 20 개 이상의 자유도를 가지며 크기와 형상이 다른 물체를 감싸 쥐거나 손끝으로 집는 등 다양한 파지 동작을 수행할 수 있다.⁽³⁾ 최근 휴머노이드 로봇, 서비스 로봇, 로봇 학습(robot learning) 연구가 활발해지면서 사람 손과 유사한 크기와 자유도를 갖는 로봇손에 대한 수요가 증가하고 있으나, 다수의 관절과 구동기를 제한된 손가락 내부 공간에 배치해야 하는 구조적 특성 때문에 다자유도 로봇손은 여전히 크기,

비용, 유지보수 측면에서 많은 제약을 갖는다.

대표적인 상용 다자유도 로봇손인 Allegro Hand⁽⁴⁾는 4개의 손가락에 16개의 관절 구동기를 배치한 연 구용 로봇손이며, Shadow Dexterous Hand⁽⁵⁾는 전완부에 배치된 모터와 텐던(tendon)을 이용하여 사람 손 과 동등한 수준의 자유도를 구현한다. 그러나 이러한 제품은 전용 소형 액추에이터 또는 복잡한 텐던 구동 구조를 사용하기 때문에 가격이 수천만 원에서 1억 원 이상에 이르고, 고장 시 제조사의 수리에 의존해야 하므로 대학의 교육 현장이나 소규모 연구실, 중소 현장에 보급하기 어렵다. 이에 대한 대안으 로 3D 프린팅과 취미용 서보모터를 이용한 저가형 로봇손이 제안되어 왔다. InMoov⁽⁶⁾는 오픈소스 3D 프 린팅 로봇손으로 전완부의 서보모터와 와이어로 손가락을 구동하며, LEAP Hand⁽⁷⁾는 시판 서보모터를 그 대로 사용하여 로봇 학습 연구용 저가 로봇손을 구현하였다. 최근 발표된 RUKA⁽⁸⁾와 ORCA Hand⁽⁹⁾는 3D 프린팅과 저가 모터를 결합하여 15~17 자유도를 구현하였으나 제작비가 200만~400만 원 수준이고, 텐던 구동 방식 특유의 복잡한 조립과 수동 장력 조절, 관절 토크 측정의 어려움, 부피 증가 문제를 안 고 있으며, 최근 출시된 상용 다자유도 로봇손⁽¹⁰⁾ 역시 고가의 전용 구동기를 사용한다. 한편 구동기 수 를 줄이기 위해 관절을 기계적으로 연동시키는 부족구동(underactuation) 방식^(11~13)과 링크 구동 방식⁽¹⁴⁾이 연구되어 왔으며, 이러한 방식은 적은 수의 구동기로 물체 형상에 순응하는 파지를 구현할 수 있다는 장점이 있다.

본 설계에서는 이러한 기존 로봇손의 장점을 결합하여, 인간 손과 유사한 크기(높이 약 20 cm)를 유지 하면서도 시판 저가형 서보모터와 3D 프린팅 부품만으로 제작할 수 있는 16 자유도 모듈화 로봇손을 제안한다. 핵심 아이디어는 다음의 네 가지이다. 첫째, 저가형 서보모터의 하우징을 제거하고 내부 부품을 손가락 형상에 맞추어 재배치한 소형 구동 모듈을 설계하여 구동부를 손가락 내부에 직접 배치하는 다이렉트 구동 방식을 적용한다. 둘째, 검지·중지·약지·소지의 PIP 관절과 DIP 관절을 링크로 연동하여 구동기의 수를 줄이면서 사람 손가락과 유사한 연속적인 굽힘 동작을 구현한다. 셋째, 링크 연동으로 제 한되는 손끝 자세를 탄성체 기반의 패시브 손끝 적응 구조로 보완하고, 엄지는 끝 관절을 독립적으로 구동하여 파지 자세의 다양성을 확보한다. 넷째, 네 손가락을 동일한 모듈로 설계하고 손바닥에서 개별 적으로 탈착할 수 있도록 하여 손가락 또는 서보모터 단위의 교체가 가능한 유지보수 구조를 구현한다.

본 보고서에서 사용하는 손가락 관절의 명칭은 Fig. 1과 같다. 손바닥과 손가락이 연결되는 관절을 MCP(metacarpophalangeal) 관절, 첫마디와 중간마디 사이의 관절을 PIP(proximal interphalangeal) 관절, 중간 마디와 끝마디 사이의 관절을 DIP(distal interphalangeal) 관절이라 한다. MCP 관절은 손가락 전체의 굽 힘·펴고 좌우 벌림 운동을 담당하고, PIP와 DIP 관절은 손가락 굽힘 운동을 담당한다. 본 설계에서 MCP 관절의 굽힘과 벌림, PIP 관절의 굽힘은 각각 서보모터로 능동 구동하며, DIP 관절은 엄지를 제외하고 PIP 관절과 링크로 연동하여 수동으로 구동한다.

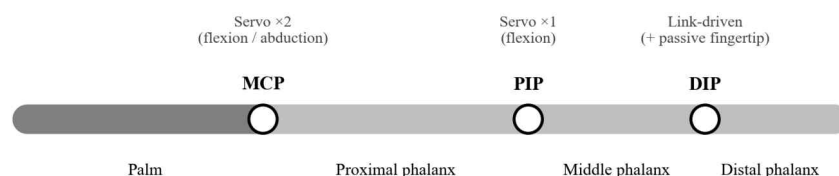


Fig. 1 Definition of finger joints (MCP, PIP and DIP) and the actuation method of each joint in the proposed hand

본 보고서의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 설계 목표와 요구조건을 정의하고, 기존 로봇손 및 구동 방식의 비교를 통한 구동 방식 선정, 서보모터 기반 소형 구동 모듈, PIP-DIP 링크 메커니즘, 엄지 독립

구동, 패시브 손끝 적응 구조, 모듈화 구조, 제어 시스템, MuJoCo 시뮬레이션 검증, 설계 제약조건과 개선 과정, 제작 및 조립, 제작 비용과 경제성 분석을 기술한다. 3장에서는 제작된 로봇손의 작동 원리와 파지 결과, 장단점과 의의, 활용 방안 및 기대 효과를 논의하며, 4장에서 결론을 제시한다.

2. 설계핵심내용

본 장에서는 서론에서 기술한 필요성과 목적을 바탕으로 설계 문제를 정의하고, 이를 해결하기 위한 설계 과정을 개념 설계에서 상세 설계, 시뮬레이션 검증, 제작에 이르는 순서로 기술한다. Fig. 2는 본 설계를 통해 완성된 로봇손의 전체 CAD 모델과 실제 제작된 프로토타입을 나타낸다.

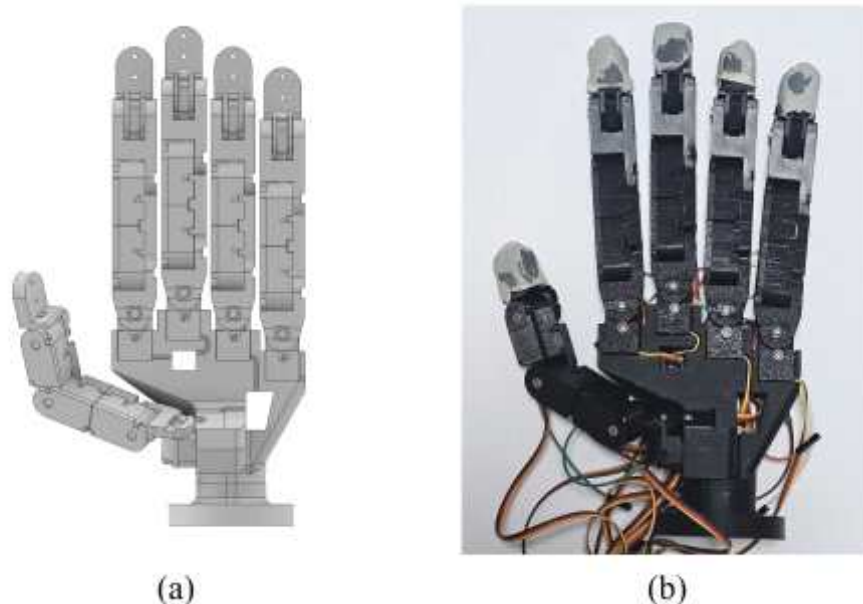


Fig. 2 Overall view of the proposed robotic hand: (a) CAD model and (b) fabricated prototype

2.1 설계 목표 및 요구조건

본 설계가 해결하고자 하는 문제는 "성인 손과 유사한 크기와 움직임을 가지면서도 제작 단가가 낮은 다자유도 로봇손을 어떻게 구현할 것인가"이다. 기존의 다자유도 로봇손은 다양한 물체를 파지하고 복잡한 손동작을 구현할 수 있다는 장점이 있으나, 다수의 구동기와 복잡한 구동 구조로 인해 전체 크기와 제작 비용이 증가할 수 있다. 이에 본 설계에서는 인간 손과 유사한 약 20 cm 내외의 크기를 유지하면서 손가락 내부에 구동부를 배치하고, 다양한 손동작을 구현할 수 있도록 총 16 자유도의 관절 구조를 목표로 설정하였다.

제작 비용을 낮추기 위해 전용 액추에이터나 고가의 구동기를 사용하는 대신 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저가형 서보모터를 기본 구동기로 선정하였다. 다만 일반적인 서보모터의 외형을 그대로 적용할 경우 손가락 내부의 제한된 공간에 배치하기 어렵기 때문에, 서보모터의 내부 부품을 손가락 형상에 맞게 재배치하는 방식을 적용하고자 하였다. 또한 각 손가락의 PIP와 DIP 관절을 링크 구조로 연동하여 필요한 구동기의 수를 줄이는 동시에 인간 손가락과 유사한 굽힘 동작을 구현하는 것을 설계 목표로 설정하였다.

로봇손은 반복적인 동작 과정에서 서보모터나 손가락 부품의 파손이 발생할 가능성이 있으므로 유지보수성 또한 주요 요구조건으로 고려하였다. 이를 위해 손가락을 각각 독립적인 모듈 형태로 구성하여 손바닥에서 개별적으로 분리할 수 있도록 하였으며, 고장 발생 시 로봇손 전체를 분해하지 않고 해당 손가락 모듈 또는 내부의 서보모터만 교체할 수 있도록 설계하였다. 특히 검지, 중지, 약지 및 소지는 동일한 구조를 적용하여 부품의 공용화와 교체 편의성을 확보하고자 하였다.

마지막으로 로봇손의 기본적인 기능인 물체 파지를 고려하여 크기와 형상이 서로 다른 물체를 안정적으로 잡을 수 있는 구조를 요구조건으로 설정하였다. 이를 위해 다수의 관절 자유도를 확보하는 것뿐만 아니라 PIP-DIP 링크 연동 구조, 엄지의 독립 구동 관절, 물체 형상에 따라 수동적으로 변형되는 패시브 손끝 구조를 적용하였다. 이상의 설계 목표와 요구조건을 정리하면 다음과 같다. ① 전체 높이 약 20 cm 내외의 인간 손 유사 크기와 다섯 손가락 배치, ② 총 16 자유도와 손가락별 독립 구동, ③ 텐던이 아닌 서보모터 개조 기반 다이렉트 구동, ④ 저가형 서보모터와 3D 프린팅 기반의 저비용 제작, ⑤ 손가락 모듈 및 서보모터의 개별 교체, ⑥ 다양한 크기의 물체 파지. 설계 검토는 중간 관절 회전각에 따른 끝 관절 회전량과 손가락 끝단 움직임 분석하는 운동학적 검토, 관절부·링크 연결부·체결부의 하중 집중을 고려한 구조 안정성 검토, 그리고 물리 시뮬레이션을 이용한 파지 동작 검증을 중심으로 진행하였다.

2.2 기존 로봇손 분석 및 구동방식 선정

본 설계에 적용할 구동 방식과 전체 구조를 결정하기 위해 기존의 다자유도 로봇손과 일반적으로 사용되는 손가락 구동 방식을 비교하였다. 로봇손은 제한된 손가락 내부 공간에 다수의 관절과 구동기를 배치해야 하므로, 단순히 자유도를 증가시키는 것뿐만 아니라 크기, 제작 비용, 구조의 복잡성, 유지보수성 등을 함께 고려할 필요가 있다. 이에 기존 상용 다자유도 로봇손의 구조적 특징을 분석하고, 일반 서보모터 직접 적용 방식, 텐던 구동 방식, 서보모터 내부 재배치 방식의 장단점을 비교하여 본 설계에 적합한 구동 방식을 선정하였다.

2.2.1 기존 다자유도 로봇손 분석

기존의 대표적인 다자유도 로봇손으로 Allegro Hand⁽⁴⁾와 Shadow Hand⁽⁵⁾를 선정하여 자유도, 크기, 구동 방식, 가격 및 유지보수성 등의 항목을 비교하였다. 두 제품은 다수의 관절을 이용하여 다양한 손 자세와 물체 파지를 구현할 수 있도록 설계된 로봇손으로, 본 설계의 자유도 구성과 구동 구조를 결정하기 위한 비교 대상으로 활용하였다. Allegro Hand는 4개의 손가락에 각 4개의 관절 구동기(총 16 자유도)를 손가락 내부에 배치한 구조이며, Shadow Hand는 20개의 구동기를 전완부에 배치하고 텐던으로 24개의 관절을 구동하는 구조이다. 3D 프린팅 기반 저가형 모델인 RUKA⁽⁸⁾와 ORCA Hand⁽⁹⁾는 200만~400만 원 수준의 제작비로 15~17 자유도를 구현하였으나 텐던 구동 방식을 사용한다.

비교에서는 단순히 자유도의 수뿐만 아니라 구동기를 어떠한 방식으로 배치하는지, 손가락 내부 공간을 어떻게 활용하는지, 고장 발생 시 부품 교체가 용이한지 등을 함께 고려하였다. 특히 본 설계는 연구용 고성능 로봇손과 동일한 성능을 목표로 하기보다는, 비교적 저렴한 부품과 3D 프린팅을 활용하여 다자유도 로봇손의 주요 기능을 구현하는 것을 목표로 하므로 가격과 구조의 단순성, 유지보수성을 중요한 비교 항목으로 설정하였다. 비교 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of commercial multi-DOF robotic hands and the proposed hand

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

	Allegro Hand	Shadow Hand	보급형 모듈화 다자유도 로봇손(본 설계)
자유도	16 (4지)	20 구동 / 24 관절 (5지)	16 (5지)
크기	성인 손보다 큼 (중량 약 1.1 kg)	성인 손 크기 (전완부 포함 약 4.3 kg)	높이 약 20 cm (성인 손 크기)
구동 방식	관절 내장 DC 모터 (전용 구동기)	전완부 모터 + 텐던 구동	재배치 저가형 서보모터 (다이렉트 구동)
구동기 배치	손가락 내부	전완부 (텐던으로 전달)	손가락 내부
가격	약 2천만 원 내외 (USD 15,000 이상)	약 1억 원 이상 (USD 100,000 이상)	약 9만 원 (부품비 기준)
손가락 모듈 교체	제조사 A/S	제조사 A/S	가능 (사용자 교체)
서보 개별 교체	불가 (전용 구동기)	불가 (전용 구동기)	가능 (시판 서보)
특징	고성능 연구용, 4지 구조	인간 손 동등 자유도, 초고가	저비용, 모듈화, 링크 연동, 패시브 손끝

Table 1의 비교 항목을 저비용, 손가락 모듈 교체 용이성, 사용자 유지보수성, 인간 손 크기 유사성, 자유도 수, 제어 용이성의 여섯 가지 설계 지표로 정리하고 1(낮음)에서 5(높음)의 상대 점수로 나타내면 Fig. 3과 같다. 상용 로봇손은 자유도, 크기, 제어 용이성 측면에서 완성도가 높고, 특히 Allegro Hand는 손가락 단위의 모듈 구조와 안정적인 제어 환경을 갖추고 있다. 그러나 전용 구동기와 높은 가격으로 인해 비용과 사용자 유지보수성 지표는 낮다. 3D 프린팅 기반 저가형 모델은 비용을 개선하였으나 텐던 구동으로 유지보수와 제어가 상대적으로 복잡하다. 본 설계는 자유도, 크기, 제어 용이성을 기존 로봇손과 유사한 수준으로 유지하면서, 시판 서보모터와 3D 프린팅 부품만으로 구성된 손가락 모듈을 통해 저비용, 모듈 교체성, 사용자 유지보수성을 높이는 데 초점을 두었다. 점수는 공개 사양과 각 설계의 구동 방식을 바탕으로 본 팀이 정의한 정성적 상대 평가이다.

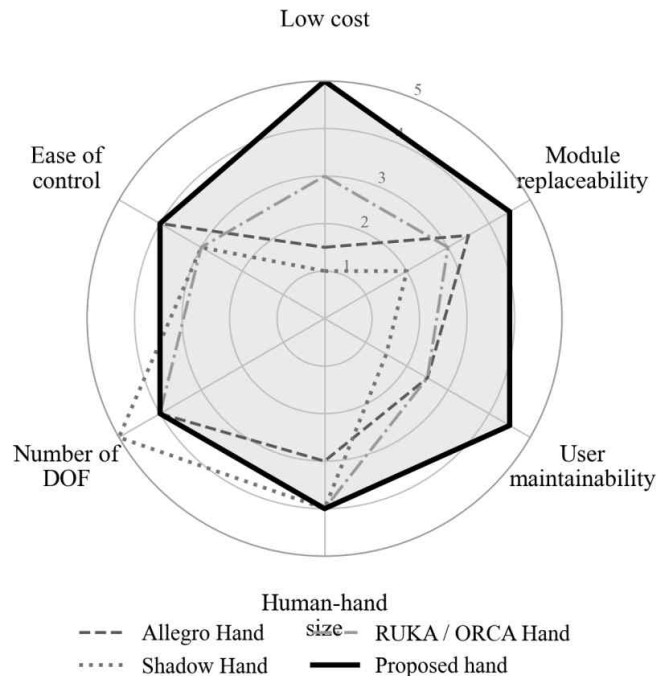


Fig. 3 Qualitative comparison of the proposed hand with existing multi-DOF robotic hands on six design indices (1: low, 5: high)

2.2.2 구동방식 비교

로봇손의 구동 방식은 손가락의 크기와 자유도, 제작 난이도 및 유지보수성에 큰 영향을 미친다. 본 설계에서는 일반 서보모터를 완제품 형태로 직접 적용하는 방식, 텐던을 이용한 구동 방식, 서보모터의

내부 부품을 재배치하는 방식을 후보로 선정하여 비교하였다.

일반 서보모터를 그대로 사용하는 방식은 상용 서보모터의 제어회로와 감속기, 위치 피드백 기능을 그대로 사용할 수 있기 때문에 구조와 제어가 단순하다는 장점이 있다. 또한 부품의 가격이 비교적 낮고 쉽게 구매할 수 있어 제작 및 유지보수가 용이하다. 그러나 서보모터의 직육면체 형태의 하우징은 사람 손가락과 같은 가늘고 긴 구조에 배치하기에는 공간 활용도가 낮으며, 여러 개의 서보모터를 손가락 내부에 배치할 경우 손가락의 전체 크기가 증가하고, 여러 관절을 구동하기 위한 링크 구조가 복잡해져 부품 간 간섭이 발생할 가능성이 있다.

텐던 구동 방식은 모터를 손가락 관절에서 떨어진 손바닥이나 전완부에 배치하고 와이어 또는 케이블을 이용하여 관절을 구동하는 방식이다. 이를 적용하면 손가락 내부에 대형 구동기를 직접 배치하지 않아도 되므로 손가락을 비교적 가볍고 작게 설계할 수 있다. 반면 텐던의 장력 조절, 마찰, 늘어남 등의 영향을 고려해야 하며, 반복 구동 과정에서 장력이 변하면 관절 움직임이 일정하지 않을 수 있다. 또한 와이어 고정부, 풀리, 복귀 구조가 추가로 필요하여 조립 이후에도 장력 조정과 유지보수가 필요한 점을 본 설계의 제작 난이도 측면에서 고려하였다.

서보모터 내부 재배치 방식은 저가형 서보모터가 가지고 있는 모터, 감속기, 위치 피드백 장치 및 제어회로를 활용하면서 기존 하우징을 제거하고 내부 부품을 로봇손의 형상에 맞게 다시 배치하는 방식이다. 이를 이용하면 일반 서보모터의 비교적 간단한 제어 방식과 낮은 비용을 유지하면서도 손가락 내부 공간을 보다 효율적으로 사용할 수 있고, 관절 근처에서 직접 구동력을 전달하므로 구동 전달 구조가 단순하다. 다만 기존 서보모터의 하우징을 그대로 사용하는 경우에 비해 별도의 프레임과 기어 배치를 설계해야 하고 배선 연장과 납땜이 필요하므로 기계 설계와 조립 과정이 추가적으로 요구된다. 구동 방식별 특징을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Comparison of finger actuation methods

	일반 서보 직접 적용	텐던 구동	서보 내부 재배치 (본 설계)
제작 비용	낮음	중간	낮음
제어 난이도	낮음	높음	낮음
공간 활용성	낮음	높음	높음
제작 난이도	낮음	높음	중간
유지보수성	높음	중간	높음
손가락 내부 구동기 배치	어려움	불필요	가능

2.2.3 최종 구동방식 선정

앞선 비교를 바탕으로 본 설계에서는 저가형 서보모터의 내부 부품을 재배치하여 손가락 내부에 직접 배치하는 다이렉트 구동 방식을 최종 구동 방식으로 선정하였다. 가장 큰 이유는 본 설계의 주요 목표인 인간 손과 유사한 크기와 저비용이라는 두 조건을 동시에 만족시키기 위해서이다.

일반 서보모터를 완제품 상태로 적용하는 경우 제작과 제어는 간단하지만, 서보 하우징의 크기와 형상으로 인해 손가락 내부의 제한된 공간을 효율적으로 활용하기 어렵다. 반대로 텐던 방식은 손가락의 소형화 측면에서는 유리하지만, 다수의 텐던과 장력 조절 구조가 필요하여 설계와 조립이 복잡해지고 유지보수 과정에서도 추가적인 조정이 필요하다.

이에 본 설계에서는 기존 저가형 서보모터의 모터, 기어, 가변저항 및 제어회로를 활용하면서 외부 하우징을 제거하고 내부 부품을 손가락 형상에 맞추어 재배치하였다. 이를 통해 별도의 고가 액추에이터를 사용하지 않고도 손가락 내부에 다수의 구동축을 배치할 수 있으며, 기존 서보모터의 위치 제어 방식을 그대로 활용할 수 있어 제어 시스템의 복잡성도 줄일 수 있다.

또한 구동부를 손가락 모듈 내부에 포함시키는 구조를 적용함으로써 손가락과 손바닥 사이에 복잡한 텐던이나 동력전달 구조를 구성할 필요가 없으며, 고장 발생 시 해당 서보 또는 손가락 모듈을 분리하여 교체할 수 있도록 하였다. 따라서 가격, 공간 활용성, 제작 난이도, 유지보수성 및 제어 편의성을 종합적으로 고려하여 서보모터 내부 재배치 방식을 최종적으로 선정하였다.

2.2.4 기존 설계와의 차별성

본 설계는 하나의 새로운 구동 원리만을 적용하기보다는 저비용 다자유도 로봇손을 구현하기 위해 여러 구조적 요소를 결합하였다. 먼저 저가형 서보모터를 그대로 장착하지 않고 내부 부품을 손가락 형상에 맞추어 재배치함으로써 제한된 공간에 다수의 구동기를 배치하였다. 이는 서보모터 하우징을 그대로 사용하거나 텐던 구동에 의존하는 기존 저가형 로봇손⁽⁶⁻⁹⁾과 구별되는 점이다.

엄지를 제외한 네 손가락에는 PIP 관절과 DIP 관절을 링크로 연동하는 구조를 적용하였다. 이를 통해 DIP 관절마다 별도의 구동기를 추가하지 않고도 PIP의 굽힘 동작에 따라 DIP가 함께 움직이도록 하여, 구동기 수를 늘리지 않으면서 손가락의 연속적인 굽힘 동작을 구현하였다. 반면 파지 과정에서 보다 다양한 자세가 요구되는 엄지는 DIP 관절을 별도의 서보모터로 독립 구동하도록 하여 일반 손가락과 구동 구조를 차별화하였다.

유지보수 측면에서는 검지, 중지, 약지 및 소지를 동일한 구조의 모듈로 설계하여 서로 교체할 수 있도록 하였으며, 각 손가락을 손바닥에서 독립적으로 분리할 수 있도록 구성하였다. 또한 손가락 전체뿐만 아니라 내부의 서보모터만 개별적으로 교체할 수 있도록 하여 고장 발생 시 필요한 부품만 교체할 수 있도록 하였다.

마지막으로 PIP-DIP 링크 구조로 인해 발생하는 손끝 자세의 한계를 보완하기 위해 별도의 능동 구동기를 추가하지 않고 탄성체를 이용한 패시브 손끝 적응 구조를 적용하였다. 따라서 본 설계는 서보모터 내부 재배치, PIP-DIP 링크 연동, 손가락 모듈화 및 패시브 손끝 적응 구조를 하나의 로봇손에 통합한 것을 주요 설계적 특징으로 한다.

2.3 서보모터 기반 소형 구동 모듈 설계

본 설계에서는 기존 서보모터의 구동 원리와 내부 전자부품은 최대한 유지하면서, 손가락의 형상과 제한된 내부 공간에 맞추어 모터와 기어, 위치 검출부 및 제어회로의 배치를 변경하는 소형 구동 모듈을 설계하였다. 이를 통해 별도의 고가 소형 액추에이터를 사용하지 않고도 손가락 내부에 다수의 구동부를 배치하는 것을 목표로 하였다.

2.3.1 기존 서보모터 구조 분석

서보모터 내부 부품의 재배치를 위해 먼저 기존 서보모터의 구조를 분석하였다. 본 설계에 사용한 MG90S 서보모터를 포함한 일반적인 소형 서보모터는 DC 모터, 감속 기어, 가변저항, 제어회로 및 외부 하우징으로 구성된다. DC 모터에서 발생한 회전은 여러 단계의 감속 기어를 거쳐 출력축으로 전달되며, 이 과정에서 회전 속도는 감소하고 관절 구동에 필요한 토크가 증가한다.

출력축의 회전 위치는 가변저항을 이용하여 검출하며, 제어회로에서는 입력된 목표 위치와 현재 위치를 비교하여 모터의 회전 방향과 구동량을 조절한다. 이러한 페루프 구조를 통해 별도의 외부 위치 센서를 설치하지 않고도 목표 각도에 따른 위치 제어가 가능하다. 본 설계에서는 DC 모터, 감속 기어, 가변저항 및 제어회로를 유지함으로써 새로운 모터 제어회로를 별도로 설계할 필요 없이 기존 서보모터의 제어 방식을 사용할 수 있도록 하였다.

반면 기존 서보모터의 외부 하우징은 내부 부품을 보호하고 하나의 완성품으로 사용하기에는 적합하지만, 사람 손가락과 같이 길고 폭이 좁은 구조에 배치하기에는 형상적인 제약이 있었다. 또한 여러 개의 서보모터를 손가락 내부에 연속적으로 배치할 경우 각 하우징이 차지하는 불필요한 공간으로 인해 인간 손과 유사한 크기를 유지하기 어려웠다. 따라서 Fig. 4 (a)와 같이 기존 서보모터를 분해하여 외부 하우징과 내부 부품의 구성 및 배치를 확인하였으며, Fig. 4 (b)와 같이 손가락 형상에 적합하도록 내부 부품을 재배치한 새로운 서보모터 모듈 구성을 검토하였다.

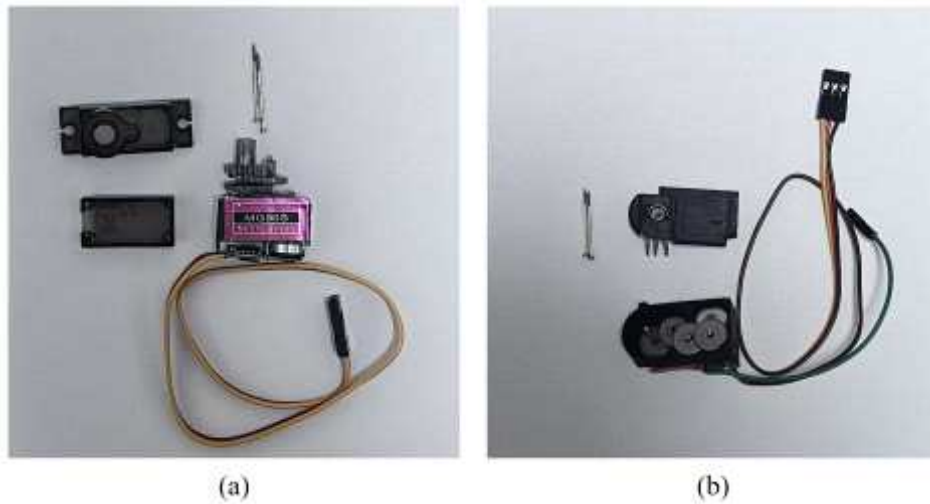


Fig. 4 Disassembly of the MG90S servo motor and reconfiguration of its internal components: (a) disassembled MG90S servo motor and (b) reconfigured servo module for integration into the robotic finger

2.3.2 서보모터 내부 재배치

기존 서보모터를 그대로 사용했을 때 가장 큰 문제는 손가락 내부 공간과 서보모터 하우징 형상 사이의 불일치였다. 본 설계는 인간 손과 유사한 약 20 cm 내외의 전체 크기를 목표로 하므로, 각 손가락 또한 사람 손가락과 유사한 폭과 길이 범위 내에서 설계할 필요가 있었다. 그러나 일반 서보모터의 하우징을 그대로 손가락 내부에 삽입하면 손가락의 폭이 지나치게 증가하거나 여러 개의 관절 구동부를 연속적으로 배치하기 어려웠다.

이를 해결하기 위해 기존 서보모터의 외부 하우징을 제거하고, 내부의 모터와 감속 기어를 손가락 구조에 맞게 재배치하였다. 특히 기존 서보모터의 기어 배치를 그대로 복제하는 것이 아니라, 각 기어의 맞물림과 감속 기능을 유지하는 범위에서 손가락의 길이 방향과 내부 공간을 활용할 수 있도록 위치를 변경하였다. 이를 통해 기존 서보모터 하우징에서 발생하던 불필요한 공간을 줄이고, 구동부 자체가 손가락 구조의 일부가 되도록 설계하였다.

재배치된 모터와 기어를 안정적으로 고정하기 위해 Fig. 5와 같이 손가락 폭과 두께에 맞춘 전용 프레임을 설계하였다. Fig. 5 (a)는 프레임 내부의 기어열 배치이고 Fig. 5 (b)는 프레임의 외형 CAD 모델이다. 해당 프레임은 단순히 서보모터를 수용하는 별도의 케이스가 아니라, 손가락 링크와 구동부 지지 구조를 함께 담당하도록 구성하였다. 프레임 설계 후에는 모터와 기어축, 가변저항, 회로부의 위치를 고려하여 각 부품이 간섭 없이 조립될 수 있는지 내부 구조를 검토하였으며, 재설계한 프레임으로 실제 조립을 진행하여 조립된 구동 모듈이 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다.

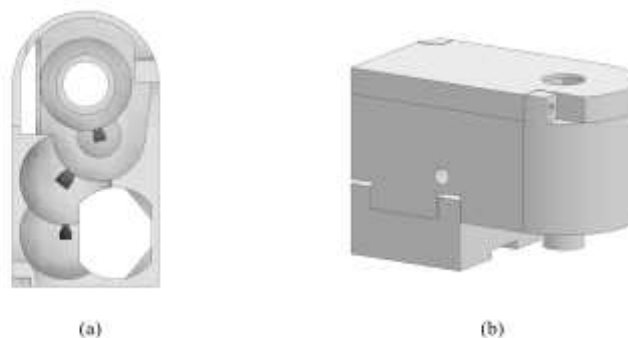


Fig. 5 Compact actuation module based on the rearranged servo: (a) gear train arrangement inside the redesigned frame (b) CAD model of the frame

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

위치 검출용 가변저항과 제어회로 역시 기존 서보모터의 기능을 유지하도록 구성하였다. 따라서 기계적인 부품 배치는 변경되었지만, 제어 측면에서는 기존 서보모터와 동일하게 목표 각도를 입력하여 관절 위치를 제어할 수 있도록 하였다. 이러한 구조는 새로운 소형 액추에이터를 별도로 제작하거나 고가의 구동기를 사용할 필요 없이, 저가형 서보모터를 기반으로 손가락 내부에 적용 가능한 소형 구동 모듈을 구현할 수 있다는 장점이 있다.

또한 서보모터의 구동부를 손가락 구조 내부에 직접 배치함으로써 이후 손가락을 하나의 독립된 모듈로 구성하기 용이하도록 하였다. 이는 손가락 자체의 소형화뿐만 아니라, 고장 발생 시 해당 손가락 또는 서보모터만 분리하여 교체할 수 있도록 하는 모듈화 구조의 기반이 된다.

2.4 손가락 관절 및 링크 메커니즘 설계

본 설계에서는 인간 손가락의 굽힘 및 좌우 움직임을 구현하면서도 손가락 내부에 배치되는 구동기의 수와 크기를 줄이기 위해 관절별로 서로 다른 구동 방식을 적용하였다. MCP 관절에는 굽힘·펼 운동과 좌우 벌림 운동을 각각 독립적으로 구동할 수 있도록 두 개의 서보모터를 배치하였으며, PIP 관절 역시 별도의 서보모터를 사용하여 능동적으로 구동하도록 설계하였다. 반면 DIP 관절은 엄지를 제외한 네 손가락에서 별도의 구동기를 사용하지 않고 PIP 관절과 링크로 연결하여 함께 굽혀지도록 구성하였다.^(13,14)

이와 같은 구조를 통해 검지, 중지, 약지 및 소지는 각각 3개의 독립적인 구동 자유도를 가지면서도 실제 손가락 끝에는 PIP와 연동되는 DIP 관절의 움직임을 추가로 구현할 수 있도록 하였다. 특히 PIP-DIP 연동 구조는 손가락 내부에 추가적인 서보모터를 배치하지 않고도 자연스러운 손가락 굽힘 형태를 구현하기 위한 핵심 기구로 설계하였다.

2.4.1 손가락 관절 구조

엄지를 제외한 네 손가락은 MCP 관절의 굽힘·펼, MCP 관절의 좌우 벌림, PIP 관절의 굽힘·펼에 각각 하나의 서보모터를 적용하였다. 이에 따라 각 손가락은 총 3개의 독립적인 구동 자유도를 갖는다. MCP 관절의 굽힘·펼 축은 손가락 전체를 손바닥 방향으로 굽히거나 펼치는 역할을 하며, MCP 관절의 좌우 벌림 축은 손가락 사이의 간격을 변화시키는 역할을 한다. 두 운동을 독립적으로 구동함으로써 단순한 굽힘 운동뿐만 아니라 물체의 크기와 형상에 따라 손가락의 위치를 조절할 수 있도록 하였다.

PIP 관절은 별도의 서보모터에 의해 능동적으로 구동되며, PIP가 굽혀질 때 DIP 관절이 함께 움직일 수 있도록 두 관절 사이에 링크 메커니즘을 적용하였다. 따라서 DIP 관절에는 별도의 서보모터가 존재하지 않으며, PIP의 회전량에 따라 링크의 기하학적 관계에 의해 DIP의 회전각이 결정된다.

이와 같은 구조는 DIP 관절에 별도의 구동기를 추가하는 방식에 비해 손가락 내부의 공간과 구동기 수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 PIP와 DIP가 연속적으로 굽혀지기 때문에 단일 관절만 회전하는 구조에 비해 손가락이 물체의 외형을 따라 감싸는 형태의 움직임을 구현할 수 있다. 엄지의 경우에는 파지 동작에서 보다 다양한 자세가 요구되므로 다른 네 손가락과 달리 DIP 관절을 독립적으로 구동하였으며, 이에 대한 구조는 2.5절에서 별도로 기술한다.

2.4.2 PIP-DIP 링크 연동 구조

엄지를 제외한 네 손가락에서는 구동기의 수를 줄이면서도 PIP와 DIP가 함께 굽혀지는 동작을 구현하기 위해 두 관절을 기계적인 링크로 연결하였다. 손가락이 완전히 펼쳐진 상태를 PIP 각도 $\theta = 0^\circ$, DIP 각도 $\phi = 0^\circ$ 로 정의하였으며, 손가락이 굽혀지는 방향을 각도의 양의 방향으로 설정하였다. 링크의 위치와 길이는 PIP가 90° 회전하였을 때 DIP도 90° 회전하도록 설계하였다. 따라서 링크 메커니즘은 식 (1)의 두 끝점 조건을 만족하도록 구성하였다.

$$\theta = 0^\circ \rightarrow \phi = 0^\circ, \quad \theta = 90^\circ \rightarrow \phi = 90^\circ \quad (1)$$

그러나 PIP와 DIP를 연결하는 링크의 회전 중심과 연결점 위치가 서로 다르기 때문에, 0° 에서 90° 사이의 구간에서는 두 관절의 각도가 단순한 1:1 선형 관계를 갖지 않는다. 따라서 PIP 각도에 따른 실제 DIP 각도를 확인하기 위해 링크 연결점의 기하학적 위치 관계를 이용하여 두 관절 사이의 관계를 계산하였다. Fig. 6은 손가락을 펼친 상태와 굽힌 상태의 링크 배치를 나타낸 CAD 형상이며, Fig. 7은 이를

기구학적 선도로 나타낸 것이다.

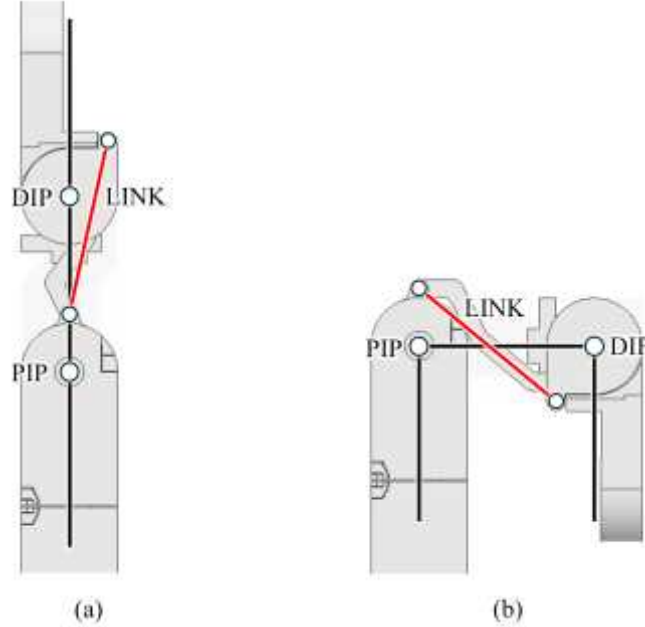


Fig. 6 CAD model of the fingertip with the PIP-DIP link mechanism: (a) extended state (b) flexed state

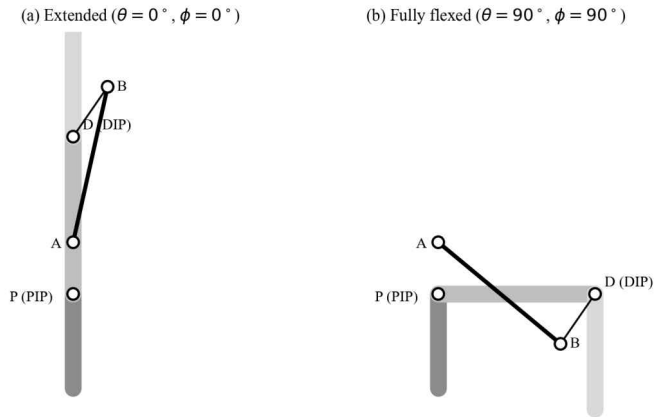


Fig. 7 Kinematic diagram of the PIP-DIP link mechanism: (a) extended state ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$) (b) fully flexed state ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 90^\circ$); P: PIP center, A: fixed link joint, D: DIP center, B: link joint on the distal side

펼친 상태에서 PIP 관절의 회전 중심을 원점 P로 설정하고, 고정 링크 연결점 A와 DIP 회전 중심 D, DIP측 링크 연결점 B의 초기 좌표를 식 (2)와 같이 정의하였다. 좌표의 단위는 mm이다.

$$P = (0, 0), \quad A = (0, 9.86), \quad D = (0, 30), \quad B = (6.6, 39.514) \quad (2)$$

PIP가 θ 만큼 회전하면 DIP 회전 중심 D의 위치는 식 (3)과 같이 변화한다.

$$D(\theta) = (30\sin\theta, 30\cos\theta) \quad (3)$$

또한 펼친 상태에서 DIP 회전 중심으로부터 링크 연결점 B까지의 상대좌표는 (6.6, 9.514)이며, DIP는 PIP와 함께 회전한 후 다시 ϕ 만큼 상대적으로 회전하므로 B의 절대 회전각은 $\theta + \phi$ 가 된다. 이에 따라 링크 연결점 B의 좌표는 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_x = 30\sin\theta + 6.6\cos(\theta + \phi) + 9.514\sin(\theta + \phi) \quad (4)$$

$$B_y = 30\cos\theta - 6.6\sin(\theta + \phi) + 9.514\cos(\theta + \phi) \quad (5)$$

한편 A와 B를 연결하는 링크는 강체이므로 두 점 사이의 거리는 동작 중 항상 일정하게 유지되어야 한다. 펼쳐진 상태에서 링크의 길이 L은 식 (6)과 같다.

$$L = \sqrt{6.6^2 + (39.514 - 9.86)^2} \approx 30.38 \text{ mm} \quad (6)$$

따라서 PIP 각도 θ 와 DIP 각도 ϕ 사이의 관계는 식 (7)의 링크 길이 조건을 만족해야 한다.

$$B_x^2 + (B_y - 9.86)^2 = L^2 \quad (7)$$

식 (7)에 각 PIP 회전각 θ 를 대입하고 링크 길이가 일정하게 유지되는 DIP 회전각 ϕ 를 수치적으로 계산하여 PIP-DIP의 각도 관계를 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 계산 결과 PIP와 DIP는 완전히 펼쳐진 상태와 최대로 굽힌 상태에서는 각각 $(0^\circ, 0)$, $(90^\circ, 90)$ 의 관계를 나타내지만, 중간 영역에서는 링크의 기하학적 특성으로 인해 비선형적인 각도 변화를 나타낸다. 구체적으로 θ 가 약 22° 이하인 초기 굽힘 구간에서는 DIP가 PIP보다 작게 회전하여 최대 약 2.5° 의 차이를 보이고($\theta = 15^\circ$ 에서 $\phi \approx 12.8^\circ$), 그 이후 구간에서는 DIP가 PIP보다 크게 회전하여 $\theta = 45^\circ$ 에서 $\phi \approx 50^\circ$, $\theta = 60^\circ$ 부근에서 최대 약 6° 앞선 뒤($\phi \approx 66^\circ$) 90° 에서 다시 일치한다. 즉, 본 설계의 PIP-DIP 링크 구조는 단순히 두 관절의 회전각을 동일하게 전달하는 구조가 아니라, 링크 연결점과 회전 중심의 위치에 따라 DIP의 회전각이 결정되는 기구학적 연동 구조이다. 이러한 특성은 굽힘 초기에는 손가락 끝이 비교적 펴진 상태로 물체에 접근하고, 굽힘이 진행될수록 손끝이 물체를 감싸는 방향으로 더 크게 열리는 형태의 움직임을 만들어 파지 동작에 유리하게 작용한다. 실제 조립한 손가락에서도 링크 구조에 의해 손가락 끝부분이 펴진 상태에서 접힌 상태로 자연스럽게 이동하며 안쪽으로 열리는 것을 확인하였다.

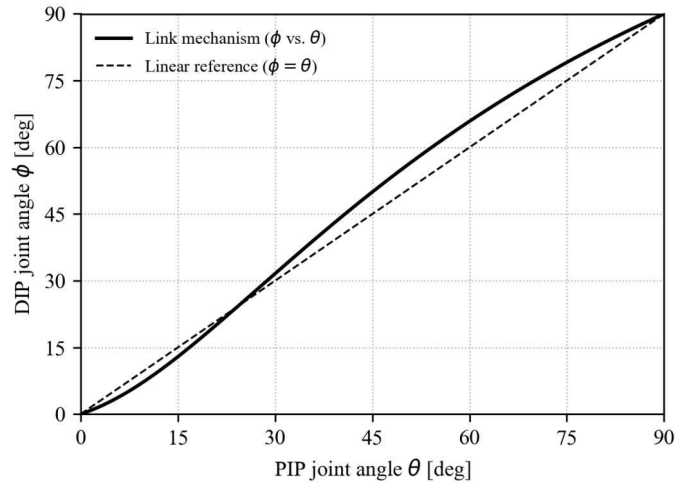


Fig. 8 Calculated relationship between the PIP joint angle θ and the DIP joint angle ϕ of the link mechanism (dashed line: linear reference $\phi = \theta$)

이러한 링크 연동 방식을 적용함으로써 DIP 관절을 위한 별도의 서보모터를 추가하지 않고도 PIP와 DIP가 함께 굽혀지는 동작을 구현하였으며, 이를 통해 손가락 내부 공간과 구동기의 수를 줄이면서 다 관절 손가락의 형태를 구현하였다.

2.5 엄지 독립 구동 및 16 자유도 설계

본 설계에서는 검지, 중지, 약지, 소지에 PIP-DIP 링크 연동 구조를 적용하여 DIP 관절을 위한 별도의 구동기 없이도 두 관절이 함께 굽혀지도록 구성하였다. 이러한 방식은 손가락 내부에 필요한 구동기의 수를 줄일 수 있다는 장점이 있으나, DIP 관절을 PIP와 독립적으로 움직일 수 없다는 제한이 있다.

일반적인 네 손가락에서는 이러한 연동 구조를 적용하더라도 물체를 감싸 쥐는 기본적인 굽힘 동작을

구현할 수 있으나, 엄지는 다른 손가락과 마주보며 물체를 감싸는 역할을 하기 때문에 보다 다양한 관절 자세가 요구된다. 이에 본 설계에서는 엄지에 대해서는 다른 네 손가락과 동일한 PIP-DIP 연동 구조를 적용하지 않고, 끝 관절에 별도의 서보모터를 추가하여 독립적으로 구동할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 엄지의 자세 조절 범위를 확대하고, 최종적으로 전체 로봇손이 총 16 자유도를 갖도록 구성하였다.

2.5.1 엄지 끝 관절 독립 구동

엄지는 물체를 파지하는 과정에서 다른 손가락과 마주보는 방향으로 위치하여 물체를 지지하고 감싸는 역할을 하므로, 손끝 관절의 각도와 접촉 위치가 파지 성능에 큰 영향을 준다. 초기 설계에서는 엄지에도 다른 손가락과 동일한 PIP-DIP 링크 연동 구조를 적용하였는데, 이 경우 중간 관절이 움직이면 손끝 관절도 정해진 비율로 함께 움직이기 때문에 엄지 끝부분을 물체 형상에 맞게 독립적으로 조절하기 어려웠다. 특히 물체를 잡을 때 엄지 끝이 물체를 눌러야 하는 방향과 접촉 위치가 제한되어, 원통형 물체나 크기가 다른 물체를 파지할 때 안정성이 떨어질 수 있음을 시제품 동작 검토와 시뮬레이션(2.9절)을 통해 확인하였다.

이를 고려하여 본 설계에서는 엄지의 DIP 관절에 적용되던 링크 연동 구조를 제거하고, Fig. 9와 같이 해당 관절을 위한 별도의 서보모터를 추가하였다. 이러한 구조를 적용함으로써 엄지 끝부분의 굽힘 각도를 별도로 제어할 수 있으며, 물체의 크기와 형상에 따라 엄지 끝의 접촉 각도와 파지 위치를 능동적으로 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 네 손가락에는 기존의 링크 연동 구조를 유지하고 엄지에만 추가 구동기를 적용함으로써, 모든 손가락의 DIP에 각각 서보모터를 추가하는 방식보다 구동기의 증가를 제한하면서 필요한 엄지 동작을 확보하도록 설계하였다.

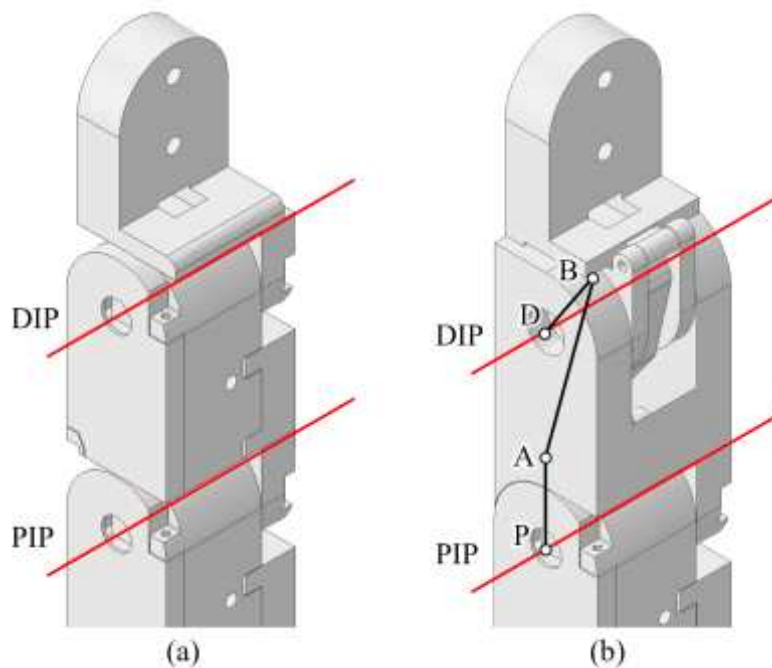


Fig. 9 Comparison of finger structures: (a) thumb with an independently driven DIP joint (b) index finger with the PIP-DIP link mechanism

2.5.2 최종 16 자유도 구성

앞서 설계한 관절 구조를 바탕으로 최종 로봇손은 총 16개의 독립적인 자유도를 갖도록 구성하였다. 검지, 중지, 약지 및 소지는 각각 MCP 관절의 굽힘, MCP 관절의 좌우 벌림, PIP 관절의 굽힘에 해당하는 3개의 독립 자유도를 갖는다. 이때 DIP 관절은 PIP와 링크를 통해 연동되어 움직이므로 별도의 독립 자유도로 계산하지 않는다. 따라서 엄지를 제외한 네 손가락의 자유도는 12 DOF가 된다. 엄지의 경우에

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

는 끝 관절을 별도의 서보모터로 독립 구동하도록 구성하여 총 4 자유도를 갖도록 설계하였다. 이에 따라 전체 로봇손의 자유도는 Table 3과 같이 16 DOF가 된다.

Table 3 Degree-of-freedom configuration of the proposed hand

	엄지	검지	중지	약지	소지	합계
자유도(DOF)	4	3	3	3	3	16
능동 관절	MCP 굽힘, MCP 벌림, PIP, DIP	MCP 굽힘, MCP 벌림, PIP	MCP 굽힘, MCP 벌림, PIP	MCP 굽힘, MCP 벌림, PIP	MCP 굽힘, MCP 벌림, PIP	16 서보
수동 관절	-	DIP (링크 연동)	DIP (링크 연동)	DIP (링크 연동)	DIP (링크 연동)	4

엄지를 제외한 네 손가락에는 링크 연동 방식을 적용하여 별도의 DIP 구동기 없이 손가락 끝 관절의 굽힘을 구현하고, 엄지에는 독립적인 DIP 구동을 적용하였다. 이를 통해 구동기의 수와 손가락 내부 공간을 고려하면서도 엄지의 추가적인 자세 조절이 가능한 16 자유도 로봇손을 구성하였다.

2.6 패시브 손끝 적응 메커니즘 설계

엄지를 제외한 네 손가락에는 구동기의 수를 줄이기 위해 PIP와 DIP 관절을 링크로 연동하는 구조를 적용하였다. 이 방식은 하나의 PIP 구동기를 이용하여 DIP 관절까지 함께 움직일 수 있다는 장점이 있지만, DIP 관절을 독립적으로 제어할 수 없기 때문에 물체의 크기와 형상에 따라 손끝의 자세를 세밀하게 조절하는 데에는 한계가 있다.

특히 크기가 작은 물체를 잡는 경우에는 손가락 전체가 물체를 감싸기보다 손끝 부근에서 접촉이 이루어지는 경우가 많다. 이때 PIP와 DIP의 자세가 링크의 기하학적 관계에 의해 결정되므로 손끝이 물체의 표면에 충분히 밀착되지 않을 수 있다. 본 설계에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 별도의 능동 구동기를 추가하지 않고, 외력에 따라 손끝의 자세가 수동적으로 변화하는 패시브 손끝 적응 메커니즘을 적용하였다. 이는 부족구동 로봇손에서 탄성 요소를 이용하여 물체 형상에 순응하는 파지를 구현한 기존 연구^(11,12)의 개념을 손끝 부분에 국한하여 적용한 것이다.

2.6.1 기존 링크 구조의 한계

PIP-DIP 링크 연동 구조에서는 PIP 관절의 회전에 따라 DIP 관절의 각도가 기계적으로 결정된다. 따라서 PIP와 DIP가 함께 굽혀지는 동작은 구현할 수 있지만, 물체와의 접촉 상태에 따라 DIP 관절 또는 손끝의 자세만을 별도로 변경하는 것은 어렵다.

이러한 특성은 비교적 큰 물체를 손가락 전체로 감싸 쥐는 경우에는 큰 문제가 되지 않지만, 작은 물체를 손끝으로 잡는 경우에는 손끝과 물체 사이의 접촉 면적이 충분히 확보되지 않을 수 있다. 즉, 링크 연동을 통해 구동기의 수를 줄이는 대신 손끝의 능동적인 자세 조절 범위가 제한되는 문제가 발생한다.

손가락의 DIP 관절마다 별도의 서보모터를 추가하면 이러한 문제를 줄일 수 있으나, 이는 구동기의 수 증가와 함께 손가락 내부 공간 및 제작 비용 증가로 이어진다. 따라서 본 설계에서는 기존의 PIP-DIP 링크 구조를 유지하면서도 손끝이 물체의 형상에 따라 일부 변형될 수 있는 별도의 수동 적응 구조를 적용하는 방향으로 문제를 해결하고자 하였다.

2.6.2 탄성체를 이용한 패시브 관절 구조

손끝의 자세 조절 범위를 보완하기 위해 본 설계에서는 탄성체를 이용한 패시브 구조를 적용하였다. 손끝 부분과 DIP 관절 상부를 탄성을 갖는 줄로 연결하여, Fig. 10과 같이 평상시에는 손끝이 기본 위치를 유지하고 물체와 접촉하여 외력이 가해질 경우에는 탄성체가 변형되면서 손끝 부분이 수동적으로 손등 방향으로 꺾이도록 구성하였다.

이 구조의 특징은 손끝의 자세 변화를 위해 별도의 서보모터나 추가적인 능동 제어가 필요하지 않다는 점이다. 물체와 접촉하지 않은 상태에서는 탄성체의 장력에 의해 손끝이 원래의 위치를 유지하며, 파지 과정에서 손끝에 힘이 작용하면 탄성체의 변형을 통해 손끝이 일정 범위 내에서 움직일 수 있다. 이후 외력이 제거되면 탄성체의 복원력에 의해 다시 초기 위치로 돌아가도록 하였다.

따라서 기존의 PIP-DIP 링크 구조에서 관절 각도가 기하학적으로 제한되더라도 손끝 자체가 물체와의 접촉에 따라 수동적으로 적응할 수 있다. 이를 통해 구동기의 수를 증가시키지 않으면서도 손끝의 접촉 자세를 보완하고자 하였다.

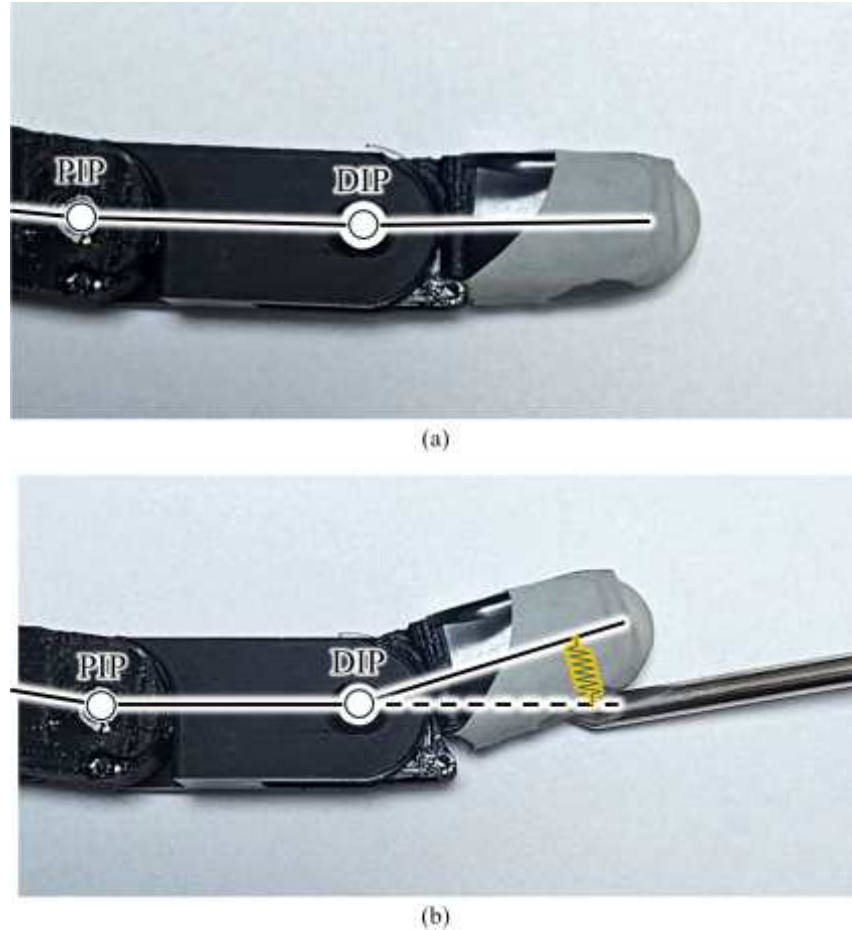


Fig. 10 Passive fingertip mechanism using an elastic cord: (a) without external force (b) fingertip deflected by contact force

2.6.3 소형 물체 파지를 위한 손끝 적응 효과

패시브 손끝 적응 구조는 특히 손가락 전체로 감싸기 어려운 작은 물체를 파지할 때 손끝과 물체 사이의 접촉 상태를 보완하기 위해 적용하였다. 작은 물체와 접촉하면 손끝 부분이 탄성체의 변형을 통해 일정 범위에서 수동적으로 자세를 변경할 수 있으므로, 고정된 손끝 구조에 비해 물체의 형상에 따라 접촉 자세가 변화할 수 있다.

이와 같은 구조는 일반 손가락의 DIP 관절에 별도의 구동기를 추가하지 않고도 손끝의 적응성을 확보할 수 있다는 점에서 본 설계의 저비용 및 소형화 목표와도 부합한다. 즉, PIP-DIP 링크 연동으로 구동기의 수를 줄이면서 발생한 손끝 자세 조절의 한계를 탄성체를 이용한 수동 구조로 일부 보완하도록 하였다. 실제 제작된 로봇손을 이용하여 Fig. 11과 같이 작은 물체를 손끝으로 파지하는 동작을 수행하였으며, 이를 통해 링크 연동 구조를 유지하면서도 손끝을 이용한 소형 물체 파지가 가능함을 확인하였다.



Fig. 11 Fingertip grasp of a thin object enabled by the passive fingertip mechanism

2.7 모듈화 구조 설계

다자유도 로봇손은 다수의 관절과 구동기를 포함하고 있어 장기간 사용하거나 반복적인 파지 동작을 수행하는 과정에서 특정 손가락 또는 서보모터에 고장이 발생할 가능성이 있다. 이때 로봇손 전체가 하나의 일체형 구조로 제작되어 있으면 일부 부품의 고장만으로도 전체 구조를 분해해야 하며, 수리 과정과 부품 교체에 많은 시간이 필요할 수 있다.

본 설계에서는 이러한 유지보수 문제를 줄이기 위해 각 손가락을 독립적인 모듈로 구성하였다. 동일한 기능을 수행하는 손가락은 가능한 범위에서 동일한 구조를 사용하도록 하였으며, 각 손가락을 손바닥에서 개별적으로 분리할 수 있도록 설계하였다. 또한 손가락 내부의 서보모터 역시 필요에 따라 개별적으로 교체할 수 있도록 하여, 고장이 발생한 부분만 선택적으로 수리할 수 있는 구조를 목표로 하였다.

2.7.1 손가락 모듈의 공용화

검지, 중지, 약지 및 소지는 기본적인 관절 구성과 구동 방식이 동일하므로 네 손가락을 동일한 구조의 모듈로 설계하였다. 각 손가락은 MCP 굽힘, MCP 좌우 벌림 및 PIP 굽힘의 3개 독립 자유도를 가지며, PIP-DIP 링크 연동 구조 역시 동일하게 적용하였다. 네 손가락의 구조를 공용화함으로써 각각의 손가락에 대해 별도의 부품을 설계하거나 제작할 필요를 줄일 수 있으며, 동일한 손가락 부품을 여러 위치에 사용할 수 있도록 하였다. 또한 특정 손가락이 파손되었을 경우 동일 구조의 손가락 모듈로 교체할 수 있어 유지보수 과정이 단순해지는 장점이 있다.

엄지는 일반 손가락과 달리 DIP 관절을 독립적으로 구동하기 때문에 PIP-DIP 부분에는 별도의 구조를 적용하였다. 그러나 엄지 전체를 완전히 별도의 구조로 설계하지 않고, Fig. 12와 같이 MCP 관절부를 포함한 아래쪽 부분은 일반 손가락과 공용 구조를 사용하도록 하였다. 이를 통해 엄지의 독립적인 구동 특성을 확보하면서도 부품 종류의 증가를 줄이고 제작 및 조립의 편의성을 높이하고자 하였다.



Fig. 12 Modular finger arrangement on the palm: common finger modules (index to little finger) and thumb-specific DIP part

2.7.2 손바닥과 손가락의 탈착 구조

각 손가락은 손바닥 구조에 완전히 고정된 일체형 구조가 아니라 독립적으로 탈착할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 하나의 손가락에 문제가 발생하더라도 다른 손가락이나 손바닥 구조를 모두 분해하지 않고 해당 손가락만 분리할 수 있도록 하였다. 손가락을 모듈 단위로 구성하면 전체 로봇손을 한 번에 조립하는 방식에 비해 손가락별 조립 상태와 구동 상태를 확인하기 용이하며, 이후 유지보수 과정에서도 필요한 모듈만 분리할 수 있다. Fig. 13은 엄지 모듈을 분리한 상태에서 네 개의 공용 손가락 모듈만 손바닥에 결합한 중간 조립 상태로, 각 손가락 모듈이 독립적으로 장착·분리됨을 보여준다.



Fig. 13 Intermediate assembly showing the four common finger modules mounted on the palm with the thumb module detached

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

또한, 검지, 중지, 약지, 소지는 동일한 구조로 제작되므로 손바닥에서 분리한 후 다른 위치에 동일한 손가락 모듈을 적용할 수 있도록 구성하였다. 이러한 손가락 모듈화는 부품의 공용화뿐만 아니라 로봇손의 유지보수성과 조립 편의성을 확보하기 위한 설계 요소이다.

2.7.3 쉬운 서보모터 교체 구조

본 설계에서는 손가락 모듈 전체뿐만 아니라 손가락 내부의 서보모터도 개별적으로 교체할 수 있도록 구성하였다. 로봇손에서 서보모터는 반복적인 관절 구동 과정에서 지속적으로 부하를 받는 부품이므로, 고장 발생 가능성을 고려한 교체 구조가 필요하다. 서보모터가 손가락 구조에 완전히 매립되어 분리할 수 없는 구조일 경우 하나의 서보 고장만으로도 손가락 전체를 다시 제작해야 할 수 있다. 이에 본 설계에서는 손가락 구조와 서보모터를 분리 가능한 형태로 구성하여, 구동기 고장이 발생한 경우 해당 서보모터만 교체할 수 있도록 하였다.

따라서 고장 정도에 따라 서보모터 단위의 교체 또는 손가락 모듈 단위의 교체를 선택할 수 있다. 서보모터만 문제가 발생한 경우에는 해당 서보를 교체하고, 3D 프린팅 부품이나 링크 구조 등 손가락 자체에 손상이 발생한 경우에는 손가락 모듈 전체를 분리하여 교체할 수 있다. 이를 통해 필요한 부분만 선택적으로 교체할 수 있도록 하여 수리 과정에서 발생하는 불필요한 부품 교체를 줄이고 유지보수성을 높이고자 하였다.

2.8 제어 시스템 설계

본 설계에서는 총 16자유도의 로봇손을 제어하기 위해 PC, ESP32, 16채널 PWM 서보 드라이버인 PCA9685⁽¹⁵⁾를 이용하여 전체 제어 시스템을 구성하였다. 로봇손은 다수의 서보모터를 동시에 제어해야 하므로, 각 서보모터에 필요한 제어 신호를 안정적으로 전달할 수 있는 구조가 필요하다. 이에 따라 PC에서 동작 명령을 전달하고, 해당 명령을 USB Serial 통신을 통해 ESP32로 전달하도록 구성하였다. ESP32에서 이를 받아 각 관절의 목표값을 결정한 후 I2C 통신으로 PCA9685에 전달하고, PCA9685가 다수의 서보모터에 PWM 제어 신호를 출력하도록 구성하였다. 전체적인 제어 흐름은 Fig. 14와 같다.

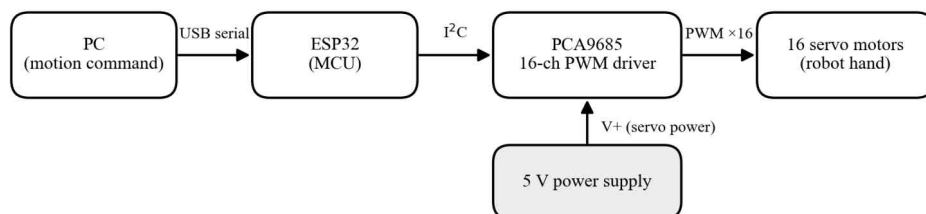


Fig. 14 Block diagram of the control system and power distribution

PC에서는 로봇손의 원하는 자세 또는 각 관절의 목표 각도를 결정하고, 해당 명령을 ESP32로 전달한다. ESP32는 입력된 명령을 바탕으로 각 자유도에 대응하는 서보모터의 목표 위치를 계산하고, PCA9685를 통해 각 서보모터에 PWM 제어 신호를 출력하도록 하였다. PCA9685는 하나의 제어 보드에서 16개의 PWM 신호를 출력할 수 있기 때문에 16개의 독립적인 구동축을 가진 본 로봇손을 제어하기에 적합한 구조이다. 이를 통해 ESP32에서 각각의 서보모터를 직접 개별 출력으로 제어하는 것보다 제어 배선을 단순화하고, 다수의 서보모터를 하나의 시스템에서 관리할 수 있도록 하였다.

2.8.1 16자유도 서보 제어 구조

본 로봇손은 엄지를 제외한 네 손가락이 각각 3 자유도, 엄지가 4 자유도로 구성되어 총 16개의 독립적인 구동축을 갖는다. 각 자유도는 하나의 서보모터에 대응되며, ESP32에서 전달되는 제어 명령에 따라 각각 독립적으로 목표 각도를 지정할 수 있도록 구성하였다. 검지, 중지, 약지, 소지의 경우 MCP 굽

힘, MCP 좌우 벌림, PIP 굽힘에 각각 하나의 서보모터가 사용되며, DIP 관절은 PIP와 링크로 연동되므로 별도의 제어 신호를 필요로 하지 않는다. 엄지는 DIP 관절을 포함하여 4개의 독립적인 관절을 각각 제어하도록 구성하였다.

따라서 제어 시스템에서는 16개의 서보모터 채널을 각각 하나의 자유도와 대응시켜 관리하도록 설계하였다. 예를 들어 각 손가락의 관절을 채널별로 구분하여 특정 관절의 목표 각도를 입력하면 해당 서보모터만 독립적으로 동작하도록 할 수 있다. 이와 같은 구조를 통해 개별 관절 제어뿐만 아니라 여러 관절을 동시에 동작시켜 손가락 굽힘, 손가락 벌림, 물체 파지와 같은 복합적인 손동작을 구현할 수 있도록 하였다.

2.8.2 전원 및 배선 구조

다수의 서보모터를 동시에 구동하는 로봇손에서는 제어 신호뿐만 아니라 안정적인 전원 공급 구조가 중요하다. 본 설계에서는 서보모터 구동을 위한 5V 전원 공급 장치를 사용하고, ESP32와 PCA9685를 통해 제어 신호가 각 서보모터에 전달되도록 배선 구조를 구성하였다. 전체 전원 및 신호의 흐름은 크게 제어부와 서보 구동부로 구분할 수 있다. ESP32는 PC에서 전달된 명령을 처리하고 PCA9685에 제어 정보를 전달하며, PCA9685는 각 채널에 연결된 서보모터에 PWM 신호를 출력한다. 서보모터의 구동 전원은 로직 전원과 분리하여 5V 전원 공급 장치에서 PCA9685의 서보 전원 단자(V+)로 직접 공급하도록 하여, 다수의 서보모터가 동시에 동작할 때 발생하는 전류 변동이 제어부에 영향을 주지 않도록 구성하였다. Fig. 15는 실제 배선 구성을 나타낸다.

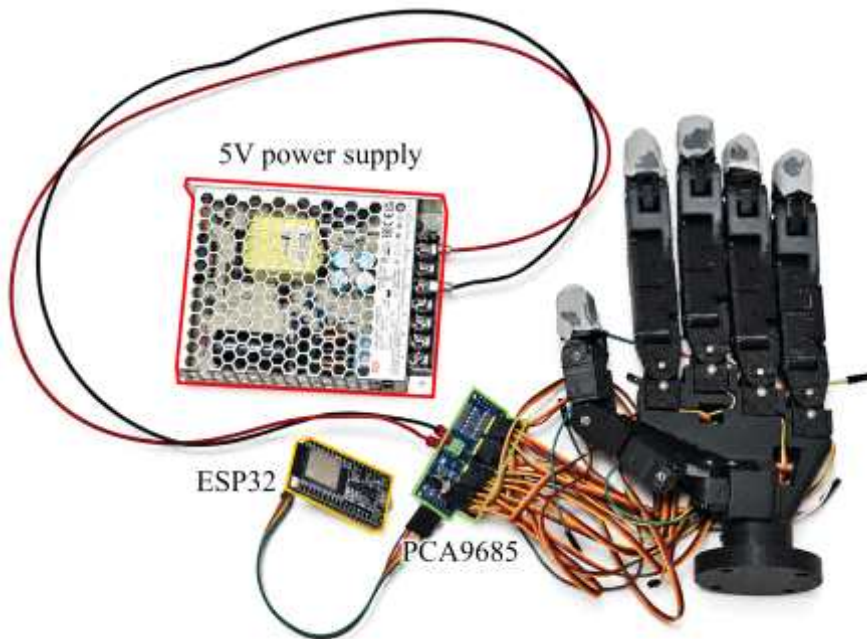


Fig. 15 Wiring of the ESP32, PCA9685 and the 5 V power supply

2.9 시뮬레이션 및 기구 설계 검증

제작에 앞서 설계한 로봇손이 물체를 의도한 방향으로 감쌀 수 있는지, 그리고 파지 시 집촉력이 어느 부위에 분포하는지를 확인하기 위해 물리 시뮬레이터 MuJoCo⁽¹⁶⁾를 이용한 파지 시뮬레이션을 수행하였다. Inventor로 작성한 조립체에서 URDF를 추출하고 이를 MuJoCo에서 사용할 수 있는 MJCF 모델로 변환하였으며, MCP 굽힘·벌림, PIP, DIP 관절을 회전 관절(revolute joint)로 정의하였다. 엄지를 제외한 네 손가락의 DIP 관절은 2.4.2절의 PIP-DIP 각도 관계에 따라 PIP 관절과 함께 회전하도록 설정하였다.

선행 테스트에서는 로봇 조작 연구의 표준 물체로 널리 사용되는 YCB 물체 세트⁽¹⁷⁾의 머스터드 병을 대상으로, 로봇손이 펼친(open) 상태에서 물체에 접근한 뒤 닫힘(close) 명령을 0에서 1까지 준정적으로

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

증가시켜 물체를 감싸 쥐도록 하였다(Fig. 16). 이 과정에서 MuJoCo가 계산한 접촉 normal force, 접촉점 수, 물체 변위를 기록하였다.

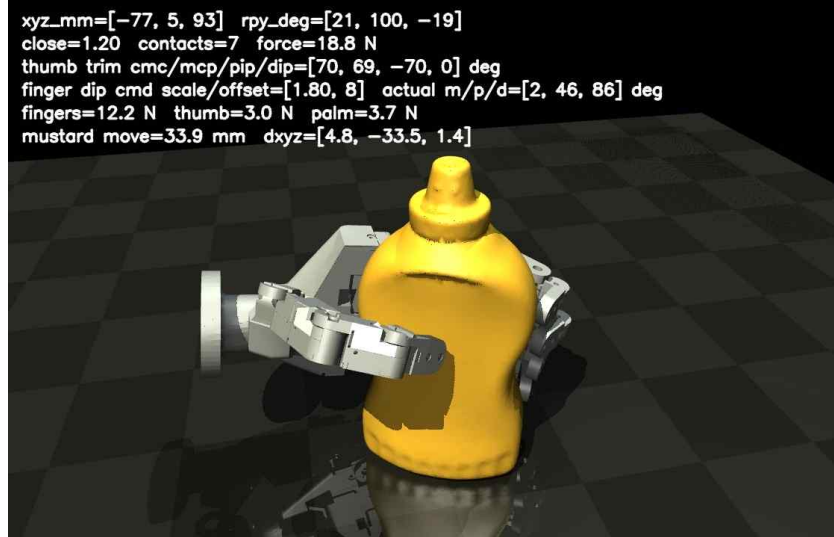


Fig. 16 Grasp simulation of the YCB mustard bottle with the MJCF model of the proposed hand in MuJoCo

Fig. 17은 닫힘 명령에 따른 접촉력과 물체 상태의 변화이다. 접촉 normal force는 손가락이 닫히는 구간에서 증가한 뒤 유지(hold) 구간에서 일정하게 유지되는 경향을 보였으며, 총 접촉 normal force는 최대 약 32.7 N까지 계산되었다. 다만 이 값은 실제 로드셀로 측정한 파지력이 아니라 시뮬레이션 접촉 모델의 계산값이므로 하드웨어의 절대 파지력으로 해석하지 않았으며, 접촉이 형성되는지, 힘이 어느 부위에 분포되는지, 물체가 손 안에서 유지되는지를 판단하는 상대적 검증 지표로 사용하였다.

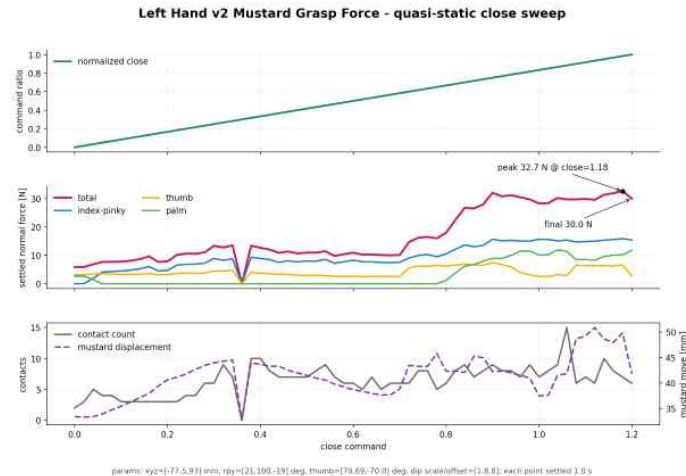


Fig. 17 Simulation results during the quasi-static close sweep: (top) normalized close command (middle) contact normal forces of the fingers, thumb and palm (bottom) number of contacts and displacement of the mustard bottle

테스트 결과 네 손가락은 물체의 한쪽 외곽을 감싸고 엄지는 반대편에서 보조 지지점을 형성하였으며, 손바닥부는 물체를 받치는 방향으로 접촉하였다. 접촉력 그래프는 순간적으로 튀는 형태가 아니라 닫힘 이후 접촉이 형성되고 유지되는 형태로 나타났고, 물체가 곧바로 이탈하거나 관절이 반대 방향으로 꺾이는 현상은 확인되지 않았다. 이로부터 현재 설계의 관절축 방향, 손끝부 링크 연동, 엄지의 대향 배치, 손바닥 지지 구조에는 제작 전 단계에서 확인 가능한 치명적인 설계 문제가 없다고 판단하였다.

한편 시뮬레이션과 초기 시제품의 동작 검토를 통해 엄지 손끝 관절이 중간 관절과 링크로 연동되어

파지 자세 조절이 제한된다는 점을 가장 큰 개선 과제로 확인하였으며, 이는 2.5절에서 기술한 엄지 DIP 독립 구동 구조로 반영하였다. 이러한 사전 검증 과정을 통해 제작 후 발생할 수 있는 재설계와 재출력을 줄일 수 있었다.

2.10 설계 제약조건 및 개선 과정 요약

본 로봇손의 설계 과정에서는 제한된 손가락 내부 공간, 3D 프린팅 부품의 제작 정밀도와 내구성, PIP-DIP 관절 연동 구조, 소형 물체 파지 성능 및 엄지의 동작 범위와 관련된 여러 제약조건이 발생하였다. 이러한 문제들은 각 설계 단계에서 원인을 분석하고, 구조 변경 또는 추가적인 기구 설계를 통해 개선하였다.

특히 기존 서보모터를 그대로 적용할 경우 발생하는 공간 문제를 해결하기 위해 서보 내부 부품의 배치를 변경하였으며, DIP 관절의 구동기 수를 줄이기 위해 PIP-DIP 링크 연동 구조를 설계하였다. 또한 링크 연동 구조로 인해 발생하는 손끝 자세 조절의 한계를 보완하기 위해 패시브 손끝 적응 구조를 추가하였으며, 엄지의 경우에는 보다 다양한 파지 자세를 구현하기 위해 DIP 관절에 독립 구동 서보모터를 추가하였다. 주요 설계 제약조건과 개선 과정은 Table 4와 같다.

Table 4 Summary of design constraints and improvements

설계 문제	원인	개선 방법	개선 결과
서보모터의 손가락 내부 배치 공간 부족	기존 서보모터 하우징의 형상이 손가락 구조와 적합하지 않음	모터, 기어 및 내부 부품을 손가락 형상에 맞게 재배치한 후 전용 구조물을 3D 프린팅으로 제작	손가락 내부에 서보 구동부를 배치할 수 있는 구조 확보
PIP-DIP 연동 방식 선정	추가적인 서보모터를 쓰지 않고 DIP를 움직이게 하기 위함	PIP와 DIP의 회전 전·후 기하학적 위치를 기준으로 링크 연결 위치와 길이를 계산하여 연동 구조 설계	별도의 DIP 구동기 없이 PIP 회전에 따라 DIP가 연동되는 구조 구현
3D 프린팅 부품의 관절 유격과 출력 오차	적층 제조 특성상 치수 오차와 마찰이 발생하여 관절 동작 범위와 부드러움이 달라짐	관절 간극을 고려한 치수 설계와 출력 후 후가공 및 조립 보정	관절이 걸림 없이 동작하는 조립 상태 확보
반복 굽힘에 의한 관절축·링크 연결부 마모 우려	힘이 집중되는 관절축, 링크 연결부, 나사 체결부의 두께가 얇음	하중 집중부의 두께 증대와 보강 구조 적용	반복 동작에서 파손 없이 동작하는 구조 확보
작은 물체 파지 시 손끝 접촉 부족	일반 손가락의 DIP가 PIP와 수동으로 연동되어 독립적인 손끝 자세 조절이 어려움	DIP 상부에 탄성체를 이용한 패시브 손끝 적응 메커니즘 적용	구동기를 추가하지 않고 물체 형상에 따라 손끝 자세가 수동적으로 변화하도록 보완
엄지를 이용한 파지 시 동작의 이질감	엄지 DIP의 자유도가 부족하여 물체를 감싸는 자세를 충분히 구현하기 어려움	엄지의 DIP 관절에 별도의 서보모터를 추가하여 독립 구동 구조 적용	엄지 끝 관절의 독립적인 자세 조절이 가능하도록 개선

2.11 제작 및 조립

앞서 설계한 로봇손의 3차원 모델을 기반으로 각 부품을 제작하고, 구동부와 링크 구조를 단계적으로 조립하여 최종 로봇손을 완성하였다. 전체 제작 과정은 3D 프린팅을 이용한 구조물 제작, 서보모터 조립, 손가락 및 링크 조립, 손바닥과 손가락의 결합, 제어부 배선 및 최종 조립의 순서로 진행하였다.

먼저 CAD를 통해 설계한 손가락 링크, 손바닥 및 서보모터 고정 구조 등의 부품을 PLA+ 필라멘트를 사용한 3D 프린팅 방식으로 제작하였다. 본 설계에서는 상용 서보모터의 기존 하우징을 그대로 사용하지 않고 내부 부품을 손가락 형상에 맞추어 재배치하였기 때문에, 서보모터의 모터와 기어를 지지하면서 동시에 손가락 구조의 일부로 사용되는 전용 부품이 필요하였다. 이에 따라 각 손가락의 구조와 내부 구동부 배치를 고려하여 설계된 부품을 출력한 후 조립에 사용하였다.

보급형 모듈화 다자유도 로봇손

3D 프린팅된 부품의 제작이 완료된 후에는 서보모터의 모터, 기어, 가변저항 및 제어부를 설계된 위치에 조립하고 배선을 연장·납땜하였다. 이후 MCP와 PIP 관절을 구성하는 각 손가락 부품을 순차적으로 결합하고, 엄지를 제외한 네 손가락에는 앞서 설계한 PIP-DIP 연동 링크를 장착하였다. 이때 링크는 PIP 관절의 회전에 따라 DIP 관절이 함께 움직일 수 있도록 설계된 연결 위치에 조립하였다. 엄지의 경우에는 일반 손가락과 달리 DIP 관절을 독립적으로 구동하도록 별도의 서보모터를 포함한 구조로 조립하였다.

각 손가락 모듈의 조립이 완료된 후에는 손가락을 손바닥 구조에 결합하였다. 검지, 중지, 약지 및 소지는 동일한 구조의 모듈을 사용하였으며, 각 손가락이 손바닥에서 독립적으로 분리될 수 있도록 앞서 설계한 탈착 구조를 이용하여 조립하였다. 엄지 역시 별도의 끝 관절 구조를 제외한 공용 부분을 활용하여 손바닥에 결합하였다. 이러한 조립 방식을 통해 손가락 또는 내부 서보모터에 문제가 발생할 경우 필요한 부분만 분리하여 교체할 수 있도록 하였다.

기구부 조립이 완료된 후에는 제어 시스템의 배선을 구성하였다. 각 관절에 사용되는 서보모터를 PCA9685 16채널 PWM 서보 드라이버에 연결하고, PCA9685와 ESP32를 연결하여 각 구동축에 제어 신호를 전달할 수 있도록 하였다. 또한 서보모터의 구동을 위한 5V 전원 공급 장치를 연결하고, PC와 ESP32는 USB Serial 통신을 통해 동작 명령을 전달할 수 있도록 구성하였다.

2.12 제작 비용 및 경제성 분석

2.12.1 제작 비용

본 설계는 고가의 전용 액추에이터나 상용 다자유도 로봇손을 사용하는 대신, 시중에서 쉽게 구할 수 있는 저가형 서보모터와 범용 마이크로컨트롤러, 3D 프린팅 부품을 이용하여 제작 비용을 낮추는 것을 주요 목표 중 하나로 설정하였다. 따라서 최종 제작비는 로봇손의 성능뿐만 아니라 본 설계의 경제성을 평가하는 중요한 요소이다.

로봇손 제작에 사용되는 주요 부품은 16개의 서보모터, ESP32, PCA9685 16채널 PWM 서보 드라이버, 3D 프린팅용 PLA+ 필라멘트, 조립용 볼트 및 너트, 5V 전원 공급 장치 등으로 구성된다. 각 부품의 구매 가격과 사용 수량을 기준으로 산출한 전체 제작 비용은 Table 5와 같다.

Table 5 Manufacturing cost of the proposed robotic hand

항목	규격	수량	단가(원)	비용(원)
서보모터	MG90S 메탈기어 마이크로 서보	16	2,090	33,440
마이크로컨트롤러	ESP32 개발 보드	1	7,000	7,000
서보 드라이버	PCA9685 16채널 PWM 서보 드라이버	1	3,300	3,300
3D 프린팅 필라멘트	eSUN PLA+ 1 kg	1	19,800	19,800
볼트 및 너트	M3 볼트(12 mm 등) 및 M3 너트 세트	1	2,000	2,000
전원 공급 장치	5V 18A SMPS	1	16,800	16,800
배선 및 소모품	점퍼선 세트, 탄성 줄, 접착제 등	1	5,000	5,000
총 제작비				87,340

이와 같이 각 부품의 실제 사용량과 구매 가격을 기준으로 전체 제작비를 산출하면, 로봇손 한 대를 제작하는 데 필요한 비용은 약 9만 원 수준이다. 이는 서보모터 16개가 전체 비용의 약 38%를 차지하며, 나머지는 제어부와 구조물 재료 및 소모품으로 구성되어 특정 고가 부품에 비용이 집중되지 않는 구조이다.

2.12.2 경제성 분석

본 설계의 경제성을 보다 명확하게 확인하기 위해 앞서 분석한 Allegro Hand 및 Shadow Hand, 그리고 3D 프린팅 기반 저가형 로봇손과 제작 비용을 비교하면 Table 6과 같다. 상용 다자유도 로봇손은 전용 소형 액추에이터, 정밀 감속기, 텐던 구동 시스템 등을 사용하여 수천만 원에서 1억 원 이상의 가격대를 형성하고 있으며, 저가형 오픈소스 로봇손도 200만~400만 원 수준의 제작비가 든다. 반면 본 설계는 저가형 서보모터의 활용, PIP-DIP 링크 연동을 통한 구동기 수 절감, 3D 프린팅 구조, 범용 제어장치 사용

및 모듈화 구조를 통해 제작비를 약 9만 원 수준으로 낮추었으며, 이는 상용 제품 가격의 1% 이하, 저가형 오픈소스 로봇손 제작비의 10% 이하에 해당한다.

Table 6 Economic comparison with existing multi-DOF robotic hands

구분	가격	특징
Allegro Hand	약 2천만 원 내외 (USD 15,000 이상)	16 DOF, 전용 구동기, 연구용 고성능
Shadow Hand	약 1억 원 이상 (USD 100,000 이상)	20 DOF 구동, 텐던 구동, 촉각 센서 옵션
RUKA / ORCA Hand	약 200만~400만 원 (제작비)	15~17 DOF, 3D 프린팅, 텐던 구동
보급형 모듈화 다자유도 로봇손 (본 설계)	약 13만 원 (부품비)	16 DOF, 재배치 서보 다이렉트 구동, 모듈화, 사용자 교체 가능

또한 유지보수 비용 측면에서도 상용 로봇손은 고장 시 제조사 수리에 의존해야 하지만, 본 설계는 개당 수천 원의 시판 서보모터와 3D 프린팅 부품으로 사용자가 직접 손가락 모듈 또는 서보모터 단위의 교체를 수행할 수 있다. 결과적으로 본 설계는 다자유도 로봇손의 주요 기능을 유지하면서 초기 제작비와 유지보수 비용을 모두 크게 낮추어 경제성을 확보하였으며, 성능 대비 비용 측면에서 교육 및 연구용 플랫폼으로서 충분한 경쟁력을 갖는다.

3. 결과 및 토의

3.1 최종 결과물 및 작동 원리

Fig. 18은 본 설계를 통해 제작된 최종 로봇손이다. 로봇손은 손바닥, 동일 구조의 손가락 모듈 4개(검지, 중지, 약지, 소지), 독립 DIP 구동 구조를 갖는 엄지 모듈로 구성되며, 총 16개의 재배치된 MG90S 서보모터가 손가락 내부에 배치되어 있다. 전체 높이는 약 20 cm로 성인 손과 유사한 크기를 가지며, 모든 구조물은 PLA+ 필라멘트를 이용한 3D 프린팅으로 제작하였다.

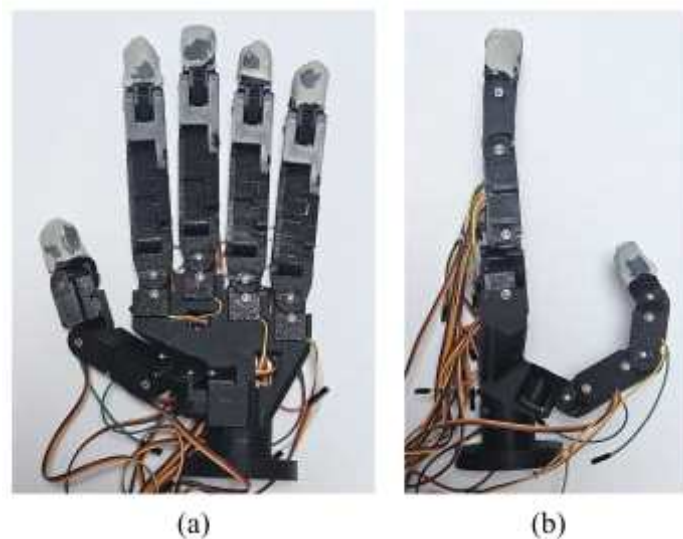


Fig. 18 Final design of the low-cost modular multi-DOF robotic hand: (a) front view (b) side view

로봇손의 작동 과정은 다음과 같다. PC에서 각 관절의 목표 각도 또는 미리 정의한 손 자세를 전달하면, 로봇손에 내장 가능한 소형 제어기(MCU)가 이를 16개 서보 채널의 PWM 값으로 변환하여 서보 드라이버를 통해 각 서보모터에 출력한다(2.8절 참조). 각 서보모터는 내부의 가변저항과 제어회로를 이용한 위치 피드백 제어로 목표 각도에 도달하므로, 상위 제어기에서는 별도의 관절 각도 센서 없이 목표 각도만을 지정하여 로봇손의 자세를 제어할 수 있다.

물체를 파지하는 과정은 크게 세 단계로 이루어진다. 첫째, MCP 관절의 좌우 벌림 서보를 이용하여 물체의 크기에 맞게 손가락 사이의 간격을 조절하고 엄지를 다른 손가락과 마주보는 위치로 이동시킨다. 둘째, MCP 굽힘 서보와 PIP 서보를 구동하여 손가락을 굽히면, 링크 연동 구조에 의해 DIP 관절이 PIP의 회전에 따라 함께 굽혀지며 손가락이 물체의 외형을 따라 감싸는 형태로 움직인다. 셋째, 손끝이 물체에 접촉하면 패시브 손끝 구조의 탄성체가 변형되어 손끝이 물체 표면에 순응하고, 엄지는 독립 구동되는 DIP 관절을 이용하여 물체를 반대편에서 눌러 파지를 완성한다.

3.2 파지 및 동작 검증

제작된 로봇손의 성능을 확인하기 위해 크기와 형상이 다른 물체를 대상으로 파지 실험을 수행하였다. Fig. 19는 원통형 물체(음료수 캔)를 파지한 모습으로, 네 손가락이 물체의 외곽을 감싸고 엄지가 반대편에서 물체를 지지하는 2.9절 시뮬레이션과 동일한 형태의 파지가 실제 하드웨어에서도 구현됨을 확인하였다. 이 과정에서 PIP-DIP 링크 연동에 의해 손가락 끝이 물체의 곡면을 따라 자연스럽게 말리는 것을 확인하였다.

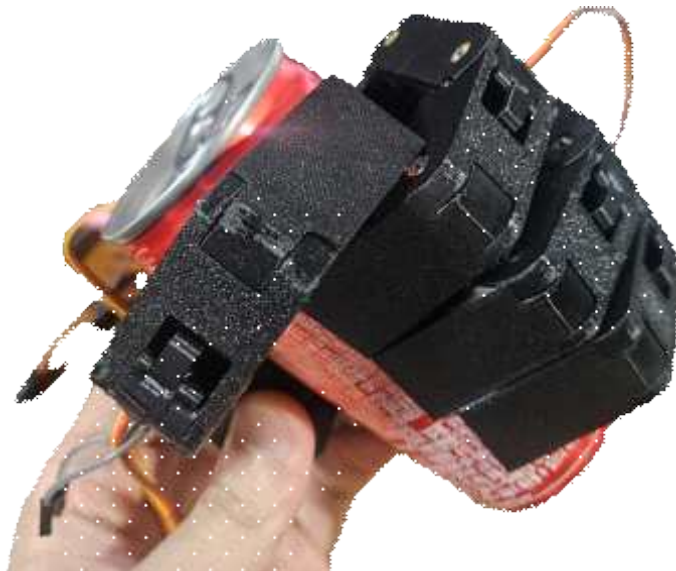


Fig. 19 Power grasp of a cylindrical object (beverage can) with the fabricated hand

Fig. 20 (a)의 큰 물체는 한 손에 딱 들어가는 크기이므로 MCP 벌림 관절을 이용해 손가락 간격을 조절한 뒤, 엄지와 나머지 손가락이 마주보며 잡는 방식으로 파지하였다. Fig. 20(b)의 중간 크기 물체는 별도의 손가락 벌림 동작 없이 파지할 수 있었으며, 물체를 손가락 전체로 안정적으로 감싸는 것이 가능함을 확인하였다. Fig. 20(c)의 매우 얇은 물체는 손가락 전체로 감쌀 수 없으므로 손끝 파지를 수행하였으며, 이 과정에서 패시브 손끝 구조가 물체와의 접촉에 따라 수동적으로 변형되어 링크 연동 구조만으로는 확보하기 어려운 손끝 접촉을 보완함을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 손가락 굽힘, 손가락 벌림, 엄지 대립 등 각 관절의 동작 방향과 가동 범위가 설계 의도 및 MuJoCo 시뮬레이션 결과와 전반적으로 일치함을 확인하였다. 특히 엄지의 DIP 관절을 독립적으로 구동함으로써 초기 설계에서 나타났던 엄지 파지의 이질감이 개선되었으며, 물체의 크기에 따라 엄지 끝의 자세를 조절하여 다양한 형태의 파지가 가능하였다.

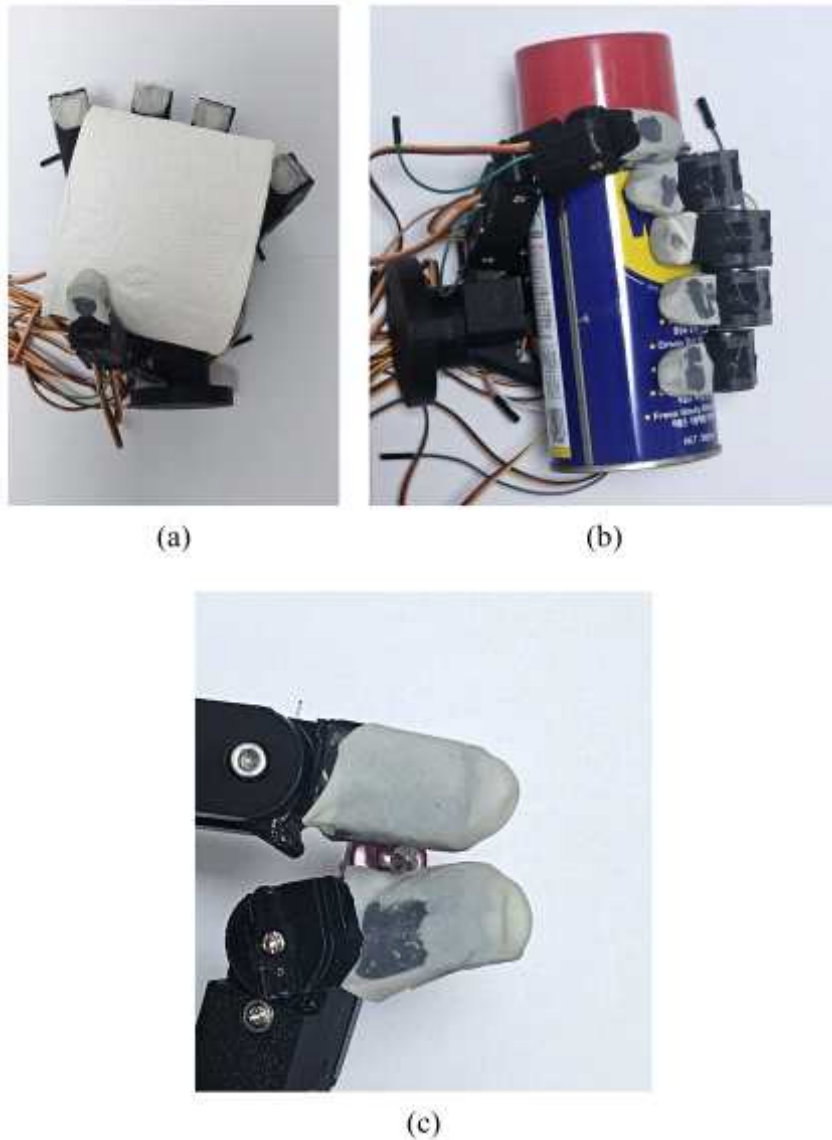


Fig. 20 Additional grasping experiments: (a) grasp of a large object using MCP abduction to increase finger spacing, (b) grasp of a medium-sized object without finger spreading, and (c) grasp of a thin object using the passive fingertip structure

3.3 모듈 교체 및 유지보수성 검증

모듈화 구조의 유효성은 제작 및 점검 과정에서 확인하였다. 각 손가락 모듈은 개별적으로 조립하여 동작을 확인한 뒤 손바닥에 장착하였으며, Fig. 13과 같이 엄지 모듈을 분리한 상태에서 네 손가락 모듈만 결합하여 동작을 점검하는 등 손가락 단위의 탈착이 실제 조립·점검 과정에서 활용되었다. 손가락 모듈은 손바닥과의 결합부를 분리하는 것만으로 다른 손가락이나 손바닥 구조를 분해하지 않고 개별적으로 분리할 수 있으며, 검지부터 소지까지 네 손가락은 동일 구조이므로 분리한 모듈을 다른 위치에 장착할 수 있다. 손가락 내부의 서보모터 역시 손가락 모듈을 분리한 상태에서 해당 서보만 교체할 수 있도록 구성하였다. 이러한 결과는 본 설계가 고장 발생 시 필요한 부분만 선택적으로 교체할 수 있는 유지보수 구조를 갖추고 있음을 보여준다.

3.4 장단점 및 의의

본 설계의 장점은 다음과 같다. 첫째, 시판 저가형 서보모터의 내부 부품을 재배치함으로써 전용 액추에이터 없이 인간 손과 유사한 크기 안에 16개의 구동축을 배치하였으며, 제작비를 상용 로봇손의 1% 이하인 약 9만 원 수준으로 낮추었다. 둘째, PIP-DIP 링크 연동과 패시브 손끝 구조를 결합하여 구동기수를 늘리지 않으면서 큰 물체의 감싸 쥐기와 작은 물체의 손끝 파지를 모두 구현하였다. 셋째, 네 손가락의 모듈 공용화와 탈착 구조를 통해 사용자가 직접 손가락 또는 서보 단위로 수리할 수 있어 유지보수 부담이 작다. 넷째, 기존 서보모터의 위치 제어 방식과 범용 제어 보드를 사용하므로 제어 시스템이 단순하여 교육용으로 활용하기 쉽다. 다섯째, 텐던 방식과 달리 장력 조절이 필요 없고 관절 근처에서 직접 구동하므로 조립성과 구조 안정성이 높다.

반면 다음과 같은 한계도 존재한다. 첫째, 소형 서보모터의 토크 한계로 인해 무거운 물체의 파지력은 제한되며, 3D 프린팅 부품의 내구성은 금속 부품을 사용하는 상용 제품에 비해 낮다. 둘째, PIP-DIP 관절 각도 관계가 링크 기하에 의해 고정되어 있어 손끝 자세의 능동적인 조절은 엄지에 한정된다. 셋째, 서보모터의 위치 제어만을 사용하므로 접촉력이나 관절 토크에 대한 피드백이 없어 파지력 제어에는 한계가 있으며, 시뮬레이션에서 확인한 접촉력 분포를 실제 하드웨어에서 정량적으로 검증하기 위해서는 손끝 힘 센서가 필요하다. 이러한 한계는 향후 금속 프레임 적용, 손끝 접촉 센서 및 전류 기반 힘 추정의 추가 등을 통해 개선할 수 있다.

본 설계의 의의는 고가의 전용 부품 없이도 다자유도 로봇손의 주요 기능을 구현할 수 있음을 보인 점에 있다. 서보 내부 재배치, 링크 연동, 패시브 손끝, 모듈화라는 개별 요소는 각각 기존 연구에서 다루어진 개념이지만, 이를 하나의 저가형 로봇손에 통합하여 크기, 비용, 유지보수성의 요구조건을 동시에 만족시킨 점이 본 설계의 차별성이다. 또한 모든 구조물이 3D 프린팅 부품과 시판 부품으로 구성되어 설계 데이터만 공유하면 누구나 동일한 로봇손을 재현할 수 있으므로, 교육용 키트 또는 오픈 하드웨어 형태의 상용화 가능성도 갖는다.

3.5 활용 방안 및 기대 효과

본 로봇손은 다음과 같은 분야에 활용될 수 있다. 첫째, 대학 및 고등학교의 로봇공학 교육에서 다관절 기구학, 링크 메커니즘, 서보 제어를 실습할 수 있는 교육용 플랫폼으로 활용할 수 있다. 저렴한 부품비와 사용자 수리가 가능한 구조는 다수의 학생이 직접 조립하고 분해하는 교육 환경에 적합하다. 둘째, 최근 활발히 연구되는 로봇 학습 분야에서 원격 조작(teleoperation)이나 모방 학습(imitation learning)을 위한 저가형 다자유도 핸드로 활용할 수 있다.^(7,8) 손가락 별 3 자유도와 엄지 4 자유도 구성은 사람 손 동작의 데이터를 로봇손에 대응시키기에 적합하며, 여러 대를 제작하여 병렬로 데이터를 수집하는 경우에도 비용 부담이 적다. 셋째, 휴머노이드 로봇이나 서비스 로봇의 말단장치를 개발하는 초기 단계에서 크기와 자유도 구성을 검증하기 위한 프로토타입으로 활용할 수 있으며, 고령화와 노동력 부족으로 자동화 수요가 커지는 중소 작업 현장에서 다양한 형상의 물체에 대응하는 저비용 파지 장치의 기초 플랫폼으로도 확장이 가능하다.

이러한 활용을 통해 기대되는 효과는 다음과 같다. 그동안 고가로 인해 접근이 어려웠던 다자유도 로봇손을 교육 현장과 소규모 연구실에서도 사용할 수 있게 되어 로봇 조작 연구의 진입 장벽을 낮출 수 있다. 또한 모듈화 구조를 통해 손가락 수나 관절 구성을 목적에 따라 변경할 수 있으므로, 본 설계는 하나의 완성품이 아니라 다양한 응용으로 확장 가능한 저가형 로봇손 플랫폼으로서의 가치를 갖는다.

4. 결 론

본 설계에서는 인간 손과 유사한 크기와 관절 움직임을 가지면서도 저가형 서보모터와 3D 프린팅만으로 제작할 수 있는 16 자유도 보급형 모듈화 다자유도 로봇손을 제안하고 제작하였다. 기존의 상용 다자유도 로봇손은 전용 액추에이터와 복잡한 구동 구조로 인해 가격이 매우 높고 유지보수가 어려우며, 3D 프린팅 기반 저가형 로봇손도 텐던 구동에 따른 조립·장력 조절 문제와 수백만 원의 제작비를 갖는다. 본 설계는 이러한 문제를 해결하기 위해 시판 서보모터의 하우징을 제거하고 내부 부품을 손가락 형상에 맞추어 재배치한 소형 구동 모듈을 설계하여 손가락 내부에 구동부를 직접 배치하는 다이렉트 구동 방식을 구현하였다.

또한 검지, 중지, 약지, 소지의 PIP 관절과 DIP 관절을 링크로 연동하여 구동기의 수를 줄이면서 사람 손가락과 유사한 연속적인 굽힘 동작을 구현하였으며, 링크 연결점의 기하학적 관계로부터 PIP 각도에 따른 DIP 각도가 비선형적으로 결정되는 특성을 해석하였다. 링크 연동으로 제한되는 손끝 자세는 탄성체를 이용한 패시브 손끝 적응 구조로 보완하여 작은 물체의 손끝 파지가 가능하도록 하였고, 엄지는 DIP 관절을 독립적으로 구동하여 파지 자세의 다양성을 확보하였다. 네 손가락을 동일한 모듈로 설계하고 손바닥에서 개별적으로 탈착할 수 있도록 하여 손가락 및 서보모터 단위의 교체가 가능한 유지보수 구조를 구현하였으며, MuJoCo 파지 시뮬레이션을 통해 관절 축 방향과 링크 연동, 엄지 대향 배치, 손바닥 지지 구조의 타당성을 제작 전에 검증하고 내장 가능한 소형 제어기(MCU) 기반의 제어 시스템으로 16개 관절을 구동하였다.

제작된 로봇손은 크기와 형상이 다른 여러 물체를 감싸 쥐거나 손끝으로 집을 수 있음을 확인하였으며, 전체 제작비는 약 9만 원 수준으로 상용 다자유도 로봇손의 1% 이하이다. 본 설계는 서보 내부 재배치, PIP-DIP 링크 연동, 패시브 손끝 적응 구조, 손가락 모듈화를 하나의 로봇손에 통합하여 크기, 비용, 유지보수성의 요구조건을 동시에 만족시켰다는 점에서 독창성을 가지며, 교육용 실습 플랫폼과 로봇 학습 연구용 저가형 로봇손으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 손끝에 촉각 센서를 달아 힘 추정 기능을 추가하여 파지력 제어를 구현해, 잡는 물체의 물성에 맞는 파지 동작을 구현할 계획이다.

후 기

본 설계를 지도해 주시고 로봇손 설계 방향에 대해 조언해 주신 성균관대학교 기계공학부 최혁렬 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bicchi, A., 2000, "Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: A Difficult Road Toward Simplicity," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 6, pp. 652~662.
- (2) Piazza, C., Grioli, G., Catalano, M. G. and Bicchi, A., 2019, "A Century of Robotic Hands," Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, Vol. 2, pp. 1~32.
- (3) Jones, L. A. and Lederman, S. J., 2006, Human Hand Function, Oxford University Press, New York, pp. 10~24.
- (4) Wonik Robotics, 2026, "Allegro Hand," Wonik Robotics Co., Ltd., Seongnam, Korea, <https://www.allegrohand.com> (accessed 2026).
- (5) Shadow Robot Company, 2026, "Shadow Dexterous Hand Series," Shadow Robot Company Ltd., London, U.K., <https://shadowrobot.com/dexterous-hand-series/> (accessed 2026).
- (6) Langevin, G., 2012, "InMoov: Open-Source 3D Printed Life-Size Robot," <http://inmoov.fr> (accessed 2026).
- (7) Shaw, K., Agarwal, A. and Pathak, D., 2023, "LEAP Hand: Low-Cost, Efficient, and Anthropomorphic Hand for Robot Learning," Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS), Daegu, Korea.
- (8) Zorin, A., Guzey, I., Yan, B., Iyer, A., Kondrich, L., Bhattasali, N. X. and Pinto, L., 2025, "RUKA: Rethinking the Design of Humanoid Hands with Learning," Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS), Los Angeles, CA, USA.
- (9) ETH Zurich Soft Robotics Lab, 2026, "The ORCA Hand: Open-Source Dexterity at Your Fingertips," <https://srl.ethz.ch/orcahand.html> (accessed 2026).
- (10) ROBOTERA, 2026, "XHAND1 Dexterous Hand," <https://www.robotera.com/en/goods1/4.html> (accessed 2026).
- (11) Dollar, A. M. and Howe, R. D., 2010, "The Highly Adaptive SDM Hand: Design and Performance Evaluation," The International Journal of Robotics Research, Vol. 29, No. 5, pp. 585~597.
- (12) Catalano, M. G., Grioli, G., Farnioli, E., Serio, A., Piazza, C. and Bicchi, A., 2014, "Adaptive Synergies for the Design and Control of the Pisa/IIT SoftHand," The International Journal of Robotics Research, Vol. 33, No. 5, pp. 768~782.
- (13) Birglen, L., Laliberté, T. and Gosselin, C., 2008, Underactuated Robotic Hands, Springer, Berlin, pp. 7~31.
- (14) Kim, U., Jung, D., Jeong, H., Park, J., Jung, H.-M., Cheong, J., Choi, H. R., Do, H. and Park, C., 2021, "Integrated Linkage-Driven Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand," Nature Communications, Vol. 12, Article 7177.
- (15) NXP Semiconductors, 2015, "PCA9685: 16-Channel, 12-Bit PWM Fm+ I2C-Bus LED Controller, Product Data Sheet Rev. 4," NXP Semiconductors N.V., Eindhoven, Netherlands.
- (16) Todorov, E., Erez, T. and Tassa, Y., 2012, "MuJoCo: A Physics Engine for Model-Based Control," Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vilamoura, Portugal, pp. 5026~5033.
- (17) Calli, B., Singh, A., Walsman, A., Srinivasa, S., Abbeel, P. and Dollar, A. M., 2015, "The YCB Object and Model Set: Towards Common Benchmarks for Manipulation Research," Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Istanbul, Turkey, pp. 510~517.