대한기계학회 주최

제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (○)				
참가분야	공모주제 ( ) / 자유주제 (○)				
참가팀명	혼자서도 잘해요				
설계제목	물체 수거가 가능한 로봇청소기				
지도교수/교사	(소속) 충남대학교 기계공학부 (성명) 이경민 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	박승현	충남대학교 기계공학부			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	박승현	충남대학교 기계공학부 / 4학년	
2	김민찬	충남대학교 기계공학부 / 4학년	
3	김현우	충남대학교 기계공학부 / 4학년	
4	육준혁	충남대학교 기계공학부 / 4학년	
5			
6			

설계 요약문

참가분야	공모주제 ( ) / 자유주제 (○)
참가팀명	혼자서도 잘해요
설계제목	물체 수거가 가능한 로봇청소기
대표자명	박승현
요약문	**설계 배경** 가사노동 중 청소를 도와주는 로봇청소기에 대한 수요가 높아지고 있지만, 로봇청소기의 청소 구역에 놓인 물체로 인해 여러 문제가 발생하기에 로봇청소기가 청소하기 전에 물체를 먼저 정리해야 한다. 본 설계는 이러한 불편을 해소하고자 물체 수거 기능이 있는 로봇청소기의 프로토타입을 제안한다. **설계 내용** 본 설계는 로봇청소기 역할을 위한 차체와 물체 수거를 위한 그리퍼와 로봇팔, 그리고 물체 인식 및 동작을 위한 제어 메커니즘이 필요하다. 1. 차체 - 로봇청소기와 유사한 외형에 자율주행과 수거 시스템에 필요한 장치들을 장착하고 상부에 수거함을 배치하여 수거한 물체를 보관할 수 있게 했다. 2. 그리퍼 - 텐던과 풀리로 3지 그리퍼의 구동기를 구성하고 부족 구동 구조로 설계함으로써 경량화했으며 다양한 형상 파지를 위한 적응형 파지를 구현하였다. 3. 로봇팔 - 로봇팔이 차지하는 공간의 최소화를 위해 랙 & 피니언 구조인 Telescopic 방식으로 설계하였으며, Depth camera에서 구한 물체까지 상대좌표를 기반으로 계산된 각 관절 변수를 통해 그리퍼를 수거 대상 물체 위치로 이동시킨다. 4. 동작 및 제어 메커니즘 - 전방에 놓인 물체를 식별하고 3D 스캐닝 기능을 통해 물체 규격 정보를 기반으로 수거 대상인지 판단하는 역할과 3차원 상대좌표를 도출한다. **설계 결과** 최종적으로 로봇청소기의 설계와 제작을 완료하여 실험 환경에서 총 3번의 실험에서 같은 초기 위치와 도착 위치를 설정하고 실험한 결과, 총 6번의 수거 동작 중 4번을 성공했다. 또한, 물체 크기 정보를 기반으로 수거 대상 평가 방법을 통해 수거할 수 없는 물체를 구별하고 회피하는 기능을 확인하였다. **기대효과** 본 장치는 로봇청소기를 운용하기 전 선행되던 바닥 및 물건 정리에 대한 불편을 해소해 줌으로써, 향후 사용자 개입을 감소, 가사노동 주체를 로봇청소기로 옮겨오는 패러다임을 제시할 것으로 기대된다.
설계프로젝트의 입상 이력	해당 사항 없음

물체 수거가 가능한 로봇청소기 개발

박승현·김민찬·육준혁·김현우·이경민†
충남대학교 기계공학부

Development of robot vacuum cleaner capable of collecting objects

Seung-Hyeon Park, Min-Chan Kim, Jun-Hyeok Yook, Hyun-Woo Kim and Kyung-min Lee†
School of Mechanical Engineering, Chungnam Natational University

(Received September 11, 2023 ; Revised January 2, 2013 ; Accepted January 3, 2013)

Key Words: Tendon-Pulley(텐던-풀리), Underactuated Gripper(부족 구동 그리퍼), Boom crane(붐크레인 구조), Hector-SLAM(헥터 위치추정 알고리즘), End effector(엔드이펙터)

초록: 본 연구에서는 자율적인 구동과 물체 수거가 가능한 로봇청소기를 설계하였다. 로봇청소기의 차체는 시중 제품과 유사하게 설계되었으며, 수거된 물체를 보관하기 위한 수납공간이 포함된다. 로봇팔은 공간 차지를 최소화하기 위해 랙 & 피니언 구조인 Telescopic 방식으로 설계되었다. 로봇팔에 End effector는 3 관절인 손가락 3개가 풀리와 텐던 구조로 연결된 그리퍼가 사용되며, 모터 하나로 적응형 파지가 가능하다. 동작 및 제어 메커니즘은 ROS의 Move Base 패키지로 자율주행을 하고, Depth 카메라를 통해 물체 분류 알고리즘인 YOLO와 3D Scanning 방식으로 물체 정보를 얻었다. 로봇의 물체 수거 및 동작 성능은 3번의 테스트에서 67% 수거 성공률을 얻을 수 있었다.

Abstract: In this study, we developed an autonomous robot cleaner with a built-in arm for collecting objects. The body similar to commercial products includes a storage space for collected objects. The arm using a Telescopic mechanism with a rack & pinion structure. The end effector is a gripper with three fingers connected by pulley & tendon and can do adaptive gripping with one motor. The mechanism uses Move Base package in ROS for autonomous driving and Depth camera using YOLO and 3D scanning methods to obtain object information. This study were able to achieve a 67% collection success rate in three tests.

1. 서 론

여성가족부의 2020년 '가족실태조사'의 '가사노동 참여 횟수 및 소요시간'에 따르면 '음식 준비'를 제외한 4개의 가사노동 중 '청소 및 정리' 노동이 주당 평균 3.5 회로 가장 빈번했다.(1) 또한, '가사노동 참여 여부'에 따르면 앞선 5개의 가사노동 중 '청소 및 정리'의 참여 비중이 74.4%로 가장 높았다. 앞선 두 지표는 가정에서 청소가 꽤 빈번하며 부담된다는 것을 보여준다. 또한, 해마다 1인 가구나 맞벌이 가정이 증가함에 따라 가구 내 가사노동의 자율화에 대한 수요가 더 증가할 것으로도 예상할 수 있다.

실제로도 청소의 자율화를 통해 가사노동의 부담을 일부 줄이고픈 수요가 확인되었다. 글로벌 마켓 인텔리전스 기업 GfK는 국내 로봇청소기 시장이 2022년 2,900억 원 규모로, 전년도 2,100억 원 규모 대비 41% 성장했다고 발표했다.(2) 이 성장으로 인해 국내 청소기 시장 내 로봇청소기의 판매 비중이 2019년 9%에서 2022년 22%로 증가했는데, 주류였던 핸드스틱청소기의 판매 비중이 동년도 78%에서 68%로 하락한 것과는 대비되는 부분이다. 또한, 2022년 100만 원 이상의 로봇청소기에 대한 수요 역시 2021년 대비 141% 증가하며 100만 원 미만 제품이 2021년 대비 3% 감소한 것과는 대비된다. 이는 소비자들이 다양한 기능을 제공하는 고급 제품을 고가임에도 불구하고 선호한다는 것을 보여준다고 할 수 있다.

† Corresponding Author, lee.km@cnu.ac.kr
ⓒ 0000 The Korean Society of Mechanical Engineers

Fig. 1 (a) Graphs related to domestic labor, and (b) Market research related to robot cleaner from GfK

앞선 분석은 가사노동의 한 부분인 청소를 로봇청소기가 대체한다고 볼 수 있다. 하지만, 인터넷 검색창에 '로봇청소기의 단점'을 검색해 보면, 로봇청소기의 사용자들이 로봇청소기가 청소를 완벽하게 수행한다 생각하지 않는다는 것을 알 수 있다.[3] 여러 문제가 있지만, 본 설계에서는 로봇청소기 가동 전 1차 정리에 주목했다. '로봇청소기를 사용하기 위해서 내가 청소를 해야 한다.'라는 말이 나올 만큼, 로봇청소기가 청소(흡입)할 수 있는 먼지나 작은 이물질을 제외한 나머지 물체는 사용자가 직접 치워야 하기에 아직 로봇청소기가 보조적인 역할에 머물러 있다고 할 수 있다. 이는 정리를 하지 않으면 로봇청소기에 문제가 생기기 때문인데, 본 설계에서는 1차 정리의 주체를 사람에서 로봇청소기로 옮기고자 한다. 로봇청소기가 청소에 대해서 주도적인 역할로 발전하기 위해서는 큰 물체에 대해서도 정리할 수 있어야 한다. 청소 중 흡입하면 안 되는 물건을 발견하면, 로봇청소기가 흡입 전에 직접 수거하여 문제가 발생하지 않도록 만들고자 한다. 이렇게 한다면 로봇청소기의 단점 중 청소 전 1차 정리 문제를 해결할 수 있을 것이고, 나아가 '청소 및 정리'라는 가사노동을 로봇청소기가 온전하게 맡아 가사노동의 부담이 줄어들 것이다.

본 설계에서는 위와 같은 사람의 도움 없이 완전한 청소를 할 수 있는 로봇청소기를 제작하고자 한다. 기존 로봇청소기들에 이미 우수한 흡입 기능이 구현되어 있으므로, 흡입 기능을 배제한 새로운 로봇청소기 모델을 제시하는 것을 목적으로 한다. 기존 모델과 확연히 구별되는 점은 로봇청소기에 로봇팔을 부착하여 흡입구를 막을 만한 물체는 수거하고 너무 큰 물체는 피함으로써 물체가 많은 바닥도 제약 없이 청소할 수 있다는 것을 보일 것이다. 본 설계 내용은 로봇청소기 역할을 해줄 차체, 수거 대상 물체를 잡기 위한 End effector와 로봇팔 구조를 소개할 것이다. 그리고 자율주행을 하는 방법과 수거 대상 물체를 식별하고 수거 명령을 주고받는 동작 및 제어 메커니즘 방법을 설명한다.

2. 차체

2.1 설계 문제 정의

기존 로봇청소기는 효율적인 이동, 회전의 용이성, 청소 효율성 등을 고려하여 대부분 원형 형상을 하고 있다. 이에 차체의 외관 설계도 로봇청소기와 유사한 형태를 가져야 한다. 로봇의 자율주행 및 물체를 식별하고 수거하는 메커니즘을 수행하기 위해서는 차체 내부에 여러 기판과 센서들이 배치되게 된다. 따라서 부품 간의 원활한 배치를 위하여 차체의 크기를 적절하게 선정해야 한다.

차체의 경우 바닥에 있는 먼지를 흡입할 수 있도록 하부 차체는 지면과 거의 밀착한 상태를 유지해야 한다. 기존 로봇청소기의 움직임을 구현하기 위해 바퀴와 균형을 잡을 지지구조로 구성된 하부 구조를 고안해야 한다. 또한, 차체 상부에 수거한 물체를 보관할 수거함과 로봇팔이 위치할 수 있게끔 구조를 설계해야 한다. 최종적으로 위 모든 부품이 장착된 상태에서 차체는 안정된 구조물이어야 한다. 위 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 기존 로봇청소기 외형과 유사해야 한다.
(2) 자율주행과 물체 수거 및 물체 인식을 위해 필요한 장치들을 배치해야 한다.
(3) 여러 기판과 센서가 배치되어야 하므로 차체의 크기가 적절해야 한다.
(4) 하부 차체가 먼지를 흡입할 수 있도록 지면과 밀접해야 한다.
(5) 기존 로봇청소기처럼 회전과 직진이 원활한 구조로 이동할 수 있어야 한다.
(6) 로봇청소기를 움직이기 위한 차체 균형이 유지되어야 한다.
(7) 로봇팔이 수거한 물체를 보관할 공간이 있어야 한다.
(8) 구조적으로 안정적이어야 한다.

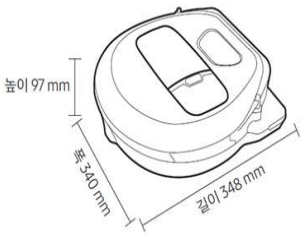
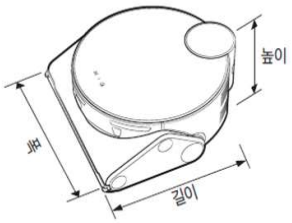
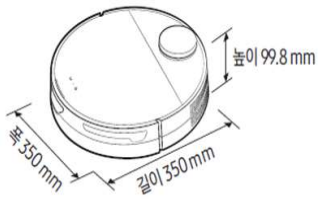
2.2 개념 설계

차체의 설계 문제를 정의하며 기존의 로봇청소기와 유사한 외형 및 구조를 가져야 한다고 언급하였다. 또한 수거한 물체를 보관할 공간이 있어야 하는 설계 문제가 요구된다. 이러한 차체 설계 문제의 해결을 중점적으로 하여 기존 로봇청소기 제품들의 종류, 규격 등의 스펙들을 조사하고 Table 1과 같이 3가지 버전의 로봇청소기를 비교하고자 한다. 각 로봇청소기 제품은 삼성전자에서 서비스하는 제품군으로 Table 1의 규격은 로봇청소기의 공식 Manual을 참고하였다.

우선 Type 1의 경우는 먼지 흡입과 같은 청소기능을 강화하였지만, 충돌 방지를 위한 센서 외에 자율주행을 위한 부품이 들어가지 않아 Lidar 등과 같은 부품 및 설계 형상이 고려되지 않았다. Type 2의 경우는 자율주행을 위한 Lidar와 부품들이 들어가 있고 먼지 청소를 위한 롤러 기능이 들어간 흡입구를 가지고 있지만 차체의 폭, 길이를 줄이며 높이가 높아진 것과 흡입구에 의해 회전 및 이동 시 제약이 발생한다. Type 3은 바닥이 아래에 붙어 먼지를 쓸어 담는 청소방식을 가진 로봇으로 자율주행 및 완전한 구형 형태의 외형을 가지고 있다. Type 1, Type 2의 경우 성능향상이 이루어져 제품의 무게가 4kg이 넘어가게 되었다는 특징을 가지고 있다.

위에서 제시하였던 차체의 설계 문제에서의 중점은 기존의 로봇청소기와 유사한 외형 및 구조, 자율주행을 위한 공간 및 설계, 로봇의 원활한 이동 및 회전이었다. Table 1의 크기 및 외형 등의 특성을 비교하여 결론적으로 Type 3의 구조가 앞선 설계 문제를 해결할 수 있는 구조로 가장 적합하다고 판단하여 해당 구조를 채택하기로 하였다.

Table 1 Comparison of body

	 **Fig. 2** Robot Type 1	 **Fig. 3** Robot Type 2	 **Fig. 4** Robot Type 3
W	340mm	305mm	350mm
L	348mm	320mm	350mm
H	97mm	120mm	99.8mm
무게	4.3kg	4.4kg	3.4kg

그러나 기존 로봇청소기의 차체 구조는 로봇팔과 수거한 물체를 담는 것을 고려하지 않은 먼지 흡입에 적합한 구조이다. 이에 설계 문제에 적합한 새로운 방식의 차체 구조가 필요하다. 위에서 채택한 Type 3의 원형 구조를 기반으로 로봇팔 및 물체 수거함이 추가되어야 한다. 이 외에도 로봇팔 등의 추가로 발생할 수 있는 Lidar, 센서 등의 노이즈를 줄이고 차체가 안정적으로 움직이기 위한 부품의 재배치와 구조적 변경 등도 고려되어야 한다.

따라서 차체에 대한 Design requirement를 설정하여 크기와 스펙 등의 방향을 결정하고 세부적인 수치를 위하여 Design specifications를 Table 2와 같이 작성하였다. Design requirement는 자율주행과 물체 수거를 목적으로 작성했으며, Design specifications는 기존 로봇청소기의 크기와 스펙을 비교하여 결정했다.

Table 2 Design requirement and Design specifications of body

Design requirement	Design specifications		
기존의 로봇청소기 형태 유지	지름	350mm	내부에 위치할 여러 기판을 위한 공간 고려
먼지 흡입 및 수거 물체 식별을 위한 속도 제한	무게	≤ 4.5kg	차체가 이동하기에 적당한 무게(기판 제외)
Lidar의 Laser 시야 확보	높이	130mm	Lidar 인식을 위한 적당한 높이 + 너무 높으면 로봇팔의 작동 범위 감소
수거 대상 물체를 하기 위한 수거함	속도	10cm/s	너무 빠르면 물체 인식에 영향을 미침

Design requirement에서 요구된 것은 기존의 로봇청소기 형태 유지, 청소 동작 수행을 위한 이동 속도 결정, Lidar의 Laser 시야 확보, 수거한 물체를 보관하기 위한 수거함이다. 특히 Lidar의 Laser 시야 확보에 대해선, 여러 부품에 의해 시야가 막히면 안 되기 때문에 Lidar뿐만 아니라 다른 부품들 역시 Lidar의 시야가 고려된 위치에 배치해야 한다. 수거함은 로봇팔의 End effector에서 수거한 물체를 보관하는 장소이기 때문에 물체를 쉽게 넣거나 뺄 수 있는 위치에 배치해야 한다. 추가로 이번 설계에서는 로봇청소기가 물체를 수거할 수 있는지가 중점이므로 Design requirement에서 먼지를 흡입하는 기능 요소는 배제하였다.

Design specifications의 경우, 우선 차체 지름을 Table 1에서 제시한 로봇청소기의 평균인 330mm에서 내부 기판 및 배터리 팩, 센서 등을 고려하여 350mm로 정하였다. 차체의 속도는 물체 인식 장치가 물체의 수거 여부 및 위치를 정확하게 인지할 수 있도록 평균적인 로봇청소기의 주행 속도인 30cm/s보다 낮은 10cm/s로 선정하였다. 차체의 높이는 시중 로봇청소기의 높이가 70 ~ 150mm인 것을 고려하여 130mm로 결정하였다. 차체의 무게는 위에서 채택한 Type 3의 로봇청소기 무게 3.4kg에서 각종 기판 및 센서, 모터, 그리고 로봇팔의 무게를 합산하고 여유 무게 수치를 더하여 4.5kg 이하로 제한을 두었다.

2.3 구조 설계

2.3.1 하판

최근에 출시되는 로봇청소기는 흡입 기능을 고려하여 일반적으로 지면에서부터 10mm의 높이를 가지고 있고, 10mm 이상의 높이를 가지는 물체를 장애물로 인식한다. 따라서, 본 설계의 차체는 흡입 기능이 없지만 기존의 로봇청소기와 유사하게 지면과 가까운 하판 구조를 지니고자 하였다. 이를 위해 하판보다 높은 위치의 단차 지지대를 설계하여 바퀴를 회전시키는 인코더 모터 등 지면과의 거리보다 큰 부품들을 고정하였다. 특히, 단차 지지대에 고정된 인코더 모터는 하판의 중간선을 따라 회전축이 위치하게 하여 기존 로봇청소기와 유사한 구조 및 작동방식을 구현하고자 하였다. 또한, 하판 전방과 후방에 볼 캐스터를 부착하여 바퀴와 높이를 맞추어 차체의 균형을 유지하도록 하였다.

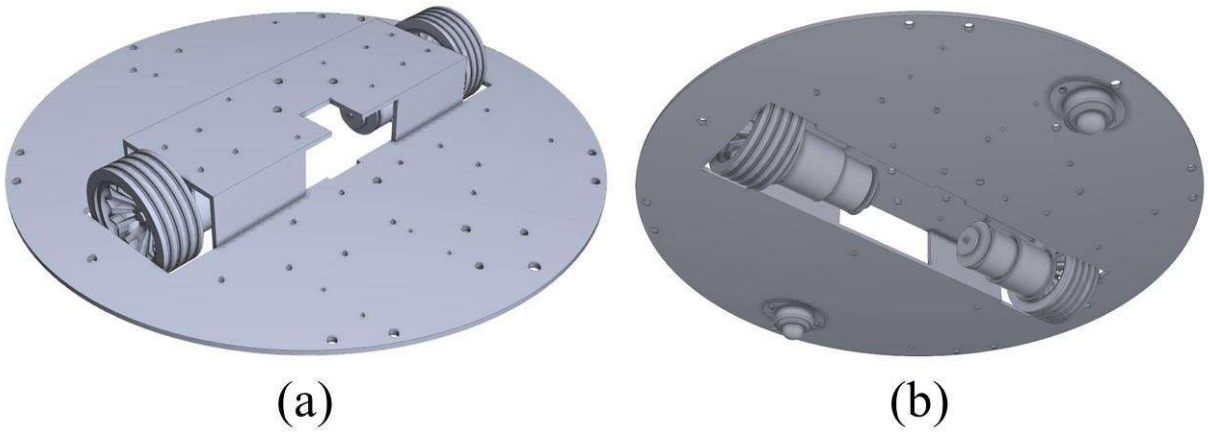


Fig. 5 (a) Upper and (b) lower sides of the bottom frame of the body

2.3.2 상판

물체를 수거함으로 넣거나 수거함에서 다시 회수할 수 있게 하기 위해서는 수거함의 접근성이 좋아야 한다. 따라서, 수거함은 차체 상판에 위치하고 물체 수거가 목적인 로봇팔도 수거함으로의 접근이 쉬워야 하기에 로봇팔도 차체 상판에 있다. 결과적으로 로봇팔이 물체를 수거하면 뒤로 회전 후 수거함에 물체를 보관할 수 있게 한다.

2.3.3 부품 배치

본 설계의 차체에는 전체 작동을 위한 부품들이 위치한다. 앞서 언급한 것처럼 부품의 배치에서 가장 중요한 것은 Lidar의 시야 확보이기에 이를 고려하여 차체 상판과 하판에 나누어 배치하였다. 차체 상판에는 앞서 언급했듯이 로봇팔과 수거함이 위치하기에 Lidar의 시야를 방해하게 된다. 따라서, Lidar는 차체 하판에 위치하게 되며, 차체 상판에는 전원 공급 목적의 T208 전원 관리 보드가 장착된 두 개의 Jetson Nano(Main Computer 역할)를 차체 상부 좌, 우측에 고정하고 IMU 센서와 무선 통신을 위한 와이파이 동글을 로봇팔과 수거함 사이에 배치한다.

차체 하판에는 Lidar, Arduino 보드, 모터 드라이버, 전력 공급을 위한 배터리와 전압 강하기 등 자율주행 및 기타 회로를 포함한 패키징이 구성된다. 특히, Lidar는 로봇청소기 기준으로 지도를 생성하고 주변 장애물을 인식하기 위해 차체 내부 중앙에 위치하는데, Lidar의 시야에 기판과 배선 등의 물체가 있으면 Laser가 막히는 문제점이 생긴다. 이 문제를 해결하기 위해 Lidar를 단차 지지대 위에 배치하여 다른 부품들보다 높이 위치시켰다. 물체 인식 장치가 로봇청소기 전방에 물체를 인식할 수 있도록 하판 앞쪽에 공간을 배치하였고, 무게가 많이 나가는 배터리의 경우 차체 뒤쪽 중앙에 위치하여 차체의 좌우 균형이 한쪽으로 쏠리지 않게끔 배치한다.

2.3.4 기둥

하판과 상판을 연결하는 기둥은 각 판의 두께와 Design specifications 중 차체의 높이로 설정한 130mm를 맞출 수 있도록 100mm의 높이를 가질 수 있도록 설계하였다. 또한 앞선 2.3.3에서 언급했듯이, Lidar가 하판에 위치하기 때문에 Design requirement 중 Lidar의 시야 확보를 위한 설계도 추가되어야 한다. 따라서, Fig. 6 (a)처럼 Laser가 이동하는 높이 부분에 구멍을 내어 시야를 방해하지 않도록 설계하였다. 설계한 기둥이 하판에 연결되면 Lidar는 Fig. 6 (b)처럼 시야를 확보할 수 있다.

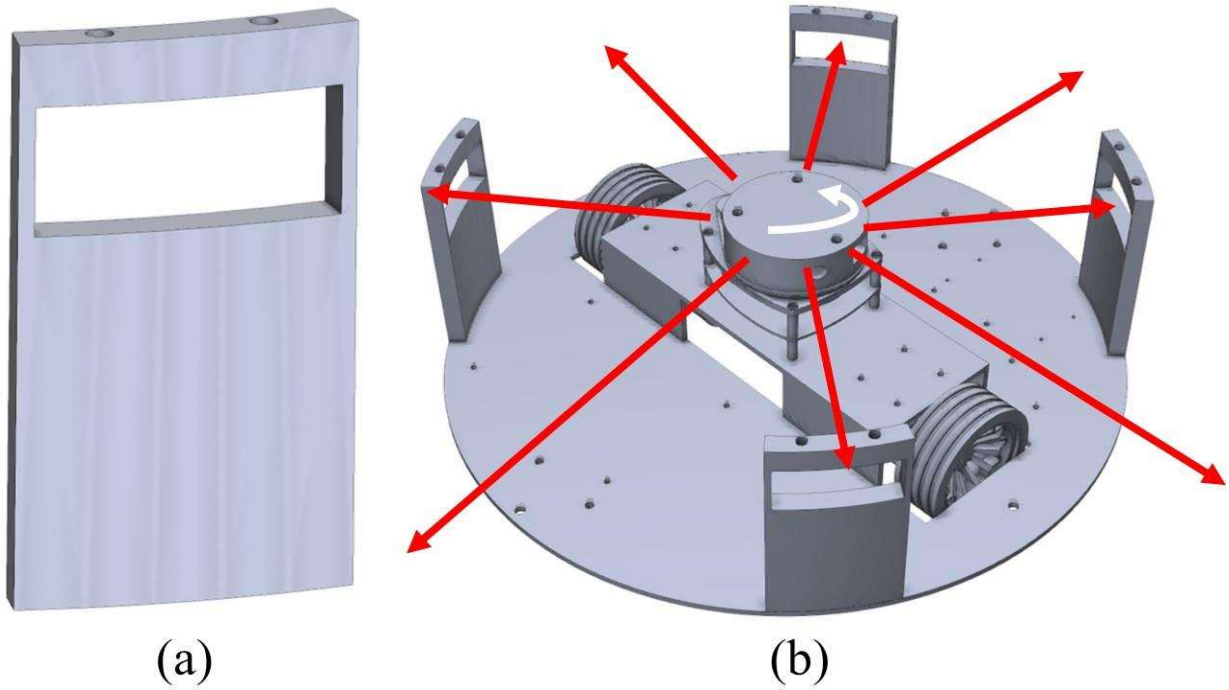


Fig. 6 (a) Column, and (b) Laser path from Lidar

Laser 구멍 옆 얇은 기둥의 두께는 얇게 설계하면 시야에 방해되지 않을 수 있다. 다만, 기둥의 두께가 너무 얇게 되면 기둥에 작용하는 로봇팔, 상판 위의 여러 기판, 상판 자체 무게 등의 하중에 의해 얇은 부분이 파괴될 염려가 있다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 RP Lidar가 물체를 인식하는 분해능을 고려함과 동시에 안전할 수 있도록 최대 두께를 계산하였다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 현재 사용하고 있는 RP Lidar-A1의 각도 분해능은 1°이다. 또한 차체 지름은 350mm인데 이를 아래 수식과 같이 분해능을 고려한 최대 두께를 계산하게 되면 t는 3.054mm이어야 한다. 따라서 이를 고려하여 기둥의 얇은 부분 두께를 3mm로 설계하였다.

Fig. 7 RP Lidar-A1 specifications

$$t \leq 350^{*}\pi^{*}\frac{1}{360} \quad \therefore t \leq 3.054\,mm$$

2.4 전체 구조

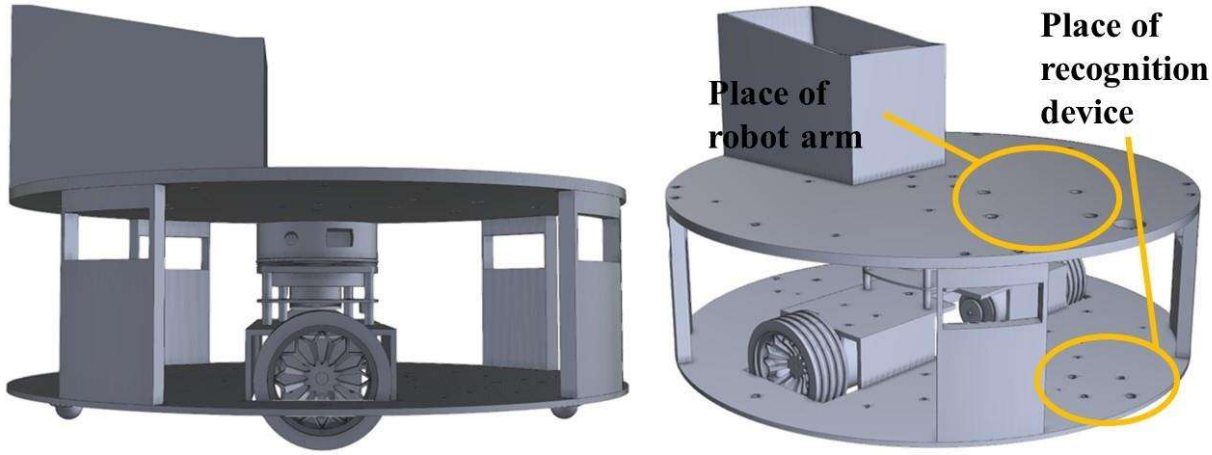


Fig. 8 3D modeling of body including Lidar

Fig. 8은 Design requirement & specifications를 바탕으로 설계한 차체이다. 구조는 하판, 상판 그리고 기둥으로 이루어져 있다. 상판 앞쪽에는 로봇팔이 위치할 것이고, 하판 앞쪽에는 물체 인식 장치가 위치할 것이다. 이 구조를 가진 차체의 구동 방식은 Lidar가 차체 하부의 중앙에서 주변 환경을 감지하여 하부 인코더 모터와 바퀴를 통해 차체를 이동시키고, 전면의 물체 인식 장치가 수거 대상 물체를 인식하면 로봇팔이 수거하고 수거함에 물체를 넣는 방식이다.

2.5 구조 해석

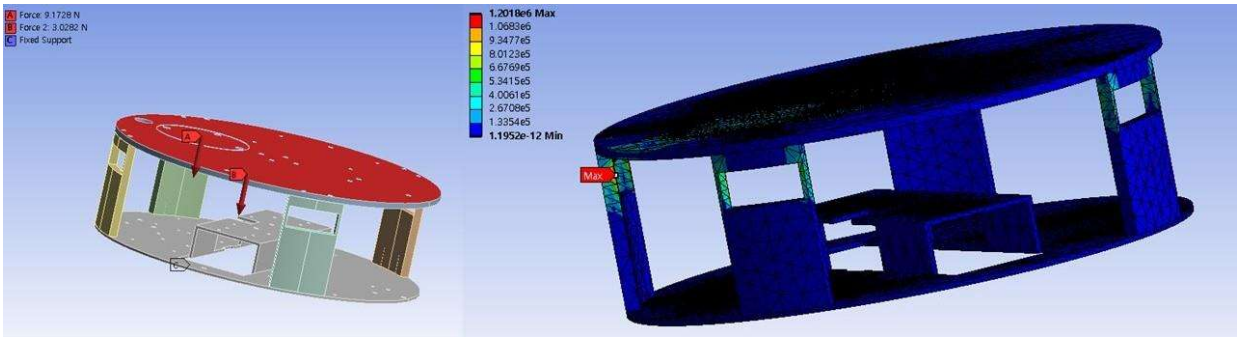


Fig. 9 Ansys of body columns

앞서 언급했듯이, Lidar의 시야 방해를 최소화하기 위해 기둥의 Laser 경로 위치 부근 높이에 구멍을 만들었다. 이때 Lidar의 분해능을 고려하여 기둥의 두께를 3mm로 얇게 설계하였는데, 기둥에는 로봇팔, 여러 기판, 상판의 자체 무게 등이 작용하므로 기둥이 파괴될 염려가 있다. 따라서 Ansys 구조해석을 통하여 기둥의 안정성을 확인하였다. 해석을 위해 하판을 fixed로 하고, 로봇팔의 무게를 9.17N, 기판과 상판의 자체 무게를 3.03N으로 하중 조건을 설정하여 해석을 진행하였다. 해석 결과 기둥의 얇은 쪽에서 최대 응력 1.2018MPa이 발생하였다. 기둥은 ABS로 제작되었는데, ABS의 최대 항복 응력은 약 27.44MPa 정도이다. 따라서 결과를 분석하면 기둥에서 발생하는 최대 응력이 최대 항복 응력에 비해 매우 작으므로 구조적으로 안전하다는 것을 확인할 수 있다.

3. End Effector

3.1 설계 문제 정의

로봇청소기가 운용되는 환경에 따라 다양한 형태와 무게를 가진 물체들이 바닥에 떨어져 있다. 따라서, 본 설계에는 다양한 End effector 중 물체를 수거하는 용도의 그리퍼가 가장 적절하다. 이러한 물체들을 그리퍼가 잡고 옮기기 위해서는 각종 형상을 잡는데 제약이 없어야 하고 무거운 물체도 떨어지지 않게 꽉 잡을 수 있어야 한다. 그러나 무거운 물체를 옮기는데 그리퍼 무게까지 무겁게 설계된다면 로봇팔 관절에 부담이 생길 것이고, 모터 크기와 전력 소모가 커지게 될 것이다. 또한, 그리퍼의 크기가 크면 평소에 수납하는 공간이나 수거하는 과정에서 주변 지형지물과 부딪칠 수 있으므로 부피도 최소한으로 설계해야 한다. 따라서, 본 연구의 그리퍼는 경량화가 필요하며 무게 대비 높은 성능이 요구된다.

무겁고 다양한 형상인 물체뿐만 아니라 적은 힘에도 쉽게 부서지거나 깨지기 쉬운 물체가 있을 수 있다. 이러한 물체들을 잡는 동안 파손된다면 오히려 공간을 더욱 더럽히게 되기 때문에 잡는 힘을 제어해서 파손 없이 수거할 수 있어야 한다. 위 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 사용 환경에 따른 다양한 형상의 물체를 파지할 수 있어야 한다.
(2) 무거운 물체가 잡힌 상태로 들릴 수 있어야 한다.
(3) 경량화가 필요하다.
(4) 무게 대비 높은 가반하중[1]이 요구된다.
(5) 잡는 힘을 조절해서 파손되기 쉬운 물체를 부서지지 않게 수거할 수 있어야 한다.

3.2 개념 설계

End effector의 설계 문제를 정의하며 다양한 형상의 물체를 파지할 수 있어야 한다고 언급했다. 해당 문제의 해결을 중점적으로 그리퍼의 다양한 구조를 조사하여 진공 흡착식 그리퍼(Vacuum Gripper)[4]와 손가락형 그리퍼(Finger Gripper)[5]~[7], 자석 그리퍼(Magnetic Gripper)[8]를 후보로 선정했다. 이후 Table 3과 같이 일정 기준을 두고 후보를 비교하였다. 진공 그리퍼는 압력이 새어 나가지 않아야 하기에 물체의 평면 곡률이 크지 않아야 하고 표면 거칠기가 낮아야 한다. 자석 그리퍼는 이송하는 물체에 자성이 있어야 하고 물체의 평면 형상 및 물체 표면에 먼지 등 이물질의 여부에 따라 이송 능력이 매우 달라진다. 따라서, 다양한 형상과 무게를 가진 물체를 안정적으로 옮기기엔 손가락형 그리퍼가 더 유리하다고 판단하여 해당 구조를 채택했다.

Table 3 Comparison of gripper structures(3 points for perfect score in each criterion)

	Fig. 10 Vacuum Gripper	**Fig. 11** Finger Gripper	**Fig. 12** Magnetic Gripper
파지 가능 물체의 다양성	2	3	1
파지 안정성	2	2	3
총점	4	5	3

1) 가반하중(Payload): 로봇이 들어 올릴 수 있는 최대 무게

하지만, 산업현장에서 사용되던 손가락형 그리퍼는 관절 당 하나의 모터가 필요하여 로봇청소기에 장착되기에는 부적합한 구조이다. 따라서 사용 환경에 맞는 새로운 구조의 손가락형 그리퍼가 필요하다. 기존 손가락형 그리퍼 외형을 기반으로 End effector도 차체 설계와 마찬가지로 Table 4에 Design requirement를 설정하여 그리퍼의 크기와 스펙 등의 설계 방향을 결정하고 Design specifications를 작성하여 세부적인 수치를 결정하였다. Design requirement는 다양한 물체 수거, 작고 가벼운 구조를 목적으로 작성되었으며, 사용 환경과 로봇청소기에 부착된다는 기준을 고려하여 Design specifications를 결정했다.

Table 4 Design requirement and Design specifications of end effector

Design requirement	Design specifications		
손가락형 그리퍼	손가락 길이	65mm	사람 손가락과 유사한 형태
그리퍼의 경량화	손바닥 면적	229.06mm^2	경량화를 위한 최소 크기
다양한 물체를 파지할 수 있는 구조	손가락 개수	3개	파지에 필요한 최소 개수
물체 파지의 안정성	파지 가능 면적	11,953mm^2	손가락 끝을 잇는 원 면적
파지를 위한 수평 유지 장치 필요	파지 가능 무게	0.3kg	수거 대상 물체 제한

Table 5 Finger length of Korean between 20~69(Unit: mm / Sources: Size Korea[9])

Age / Finger	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-59	60-69	Average
Thumb	49.75	49.57	48.67	49.02	48.34	48.60	47.41	46.88	48.53
Index finger	67.85	67.74	67.31	67.30	66.84	67.62	66.56	67.18	67.30
Middle finger	76.02	75.62	74.78	74.85	73.77	74.19	72.65	72.48	74.30
Overall Average				63.38					

Design specifications의 경우, 사람 손을 모방하는 것을 기준으로 두고 크기 및 스펙을 결정하였다. 따라서, Table 5의 전체 평균을 고려하여 손가락 길이는 65mm로 정했고 관절 개수는 3개로 채택하였다. 다만 '손가락 개수' 같은 경우, 그리퍼의 경량화를 위해 사람 손과 비교하여 손가락의 개수를 줄일 필요가 있었기에 파지 안정성을 고려하여 손가락이 3개인 '3지 그리퍼'를 채택하였다. 손바닥의 크기 역시 그리퍼의 경량화를 위해 손가락 개수에 맞는 풀리 3개와 모터에 부착될 중심 기어, 중심 기어와 맞물리며 풀리 위에 부착될 스퍼기어 등을 고려하여 한 변의 길이가 23mm인 정육각형으로 크기를 정하였다. 또한, 손가락 길이와 가정에서 흔히 로봇청소기의 흡입구를 막을 만한 물체들을 기준으로 파지할 수 있는 최대 파지 가능 면적과 무게를 제한했다. 특히 최대 파지 가능 면적은 손바닥과 가까운 관절이 45°로 굽혀지고 나머지 관절이 펴진 상태를 기준으로 각 손가락 끝을 잇는 원의 면적을 계산하고 안정적인 파지를 위해 계산된 값에 80%에 해당하는 수치를 최대 파지 가능 면적으로 설정했다. 이는 손바닥과 가까운 관절이 90°로 펴져 있을 때를 완전히 펴진 상태로 간주하면 45°를 기준으로 그리퍼를 움켜쥐거나 피는 동작이 나뉘기 때문에 45°를 기준으로 측정한 것이다.

3.3 구조 설계

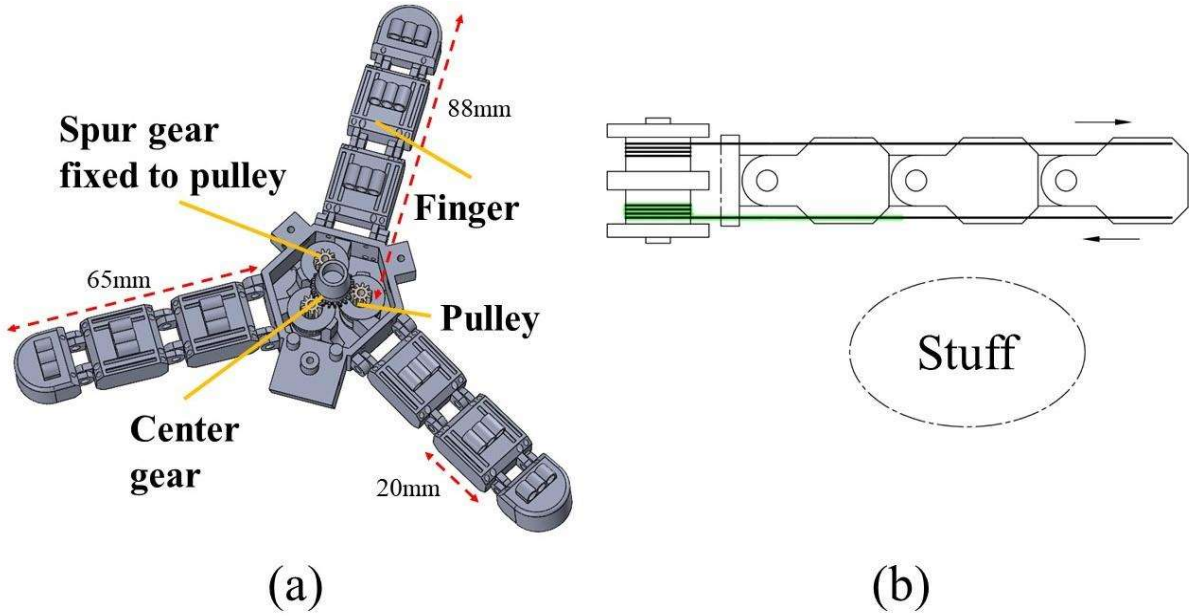


Fig. 13 (a) Gripper structure model, and (b) Connection paths of top & bottom tendon in finger

Fig. 13은 설계한 End effector의 전체적인 내부 모습이다. 전체적인 구조를 살펴보면 중심 기어, 3개의 스퍼기어와 풀리, 텐던, 손가락 및 손바닥의 조합으로 구성되어 있다. 서보 모터가 내부 중앙의 중심 기어와 연결되어 회전하게 된다. 중심 기어 옆에 3개의 기어가 맞물려 중심 기어가 회전하면 같이 회전할 수 있도록 구성하였다. 3개의 기어는 각각 풀리 위에 붙어있고, 풀리는 상, 하부의 2단으로 구성되어 각각 텐던이 연결되어 있다. 풀리와 연결되지 않은 텐던의 반대쪽은 손가락 상부와 하부의 구멍을 통과하여 다시 손바닥 안으로 들어오며, 하부의 텐던은 다른 풀리에 연결되고 상부의 텐던은 손바닥에 고정된다. 3.2에서 언급했듯이 손가락 1개의 전체 길이는 약 65mm이고 중심 기어로부터 손가락 끝까지의 길이는 약 88mm이며, 손가락 각 마디의 길이는 약 20mm 길이로 설계하였다. 내부에는 '텐던(tendon)-풀리(pulley)' 구조와 부족 구동, 적응형 파지, 인체 모방형 파지 등이 적용되었다.

3.3.1 텐던-풀리 구조와 부족 구동

손가락형 그리퍼 구조도 손가락을 어떻게 구동하는지에 따라 텐던을 이용하는 방식과 자석 기어를 사용하는 방식, 여러 기어를 조합하는 방식 등 다양한 방식이 있다. 다양한 방식 중 Design requirement의 '그리퍼의 경량화'에 가장 적합한 방식을 찾는 과정을 통해 본 그리퍼에는 텐던(tendon)-풀리(pulley) 구조를 적용하기로 했다. 또한, 그리퍼의 구성 요소 중 크기에 따라 무게가 달라지는 하드웨어를 제외한 가장 무거운 장치는 모터라고 볼 수 있다. 따라서 하나의 모터로 손가락을 움직일 수 있는 부족 구동 방식도 채택했다. 최종적으로 해당 구조는 하나의 모터로 2개 이상의 풀리를 회전시켜 각 풀리에 연결되어 손가락을 통과하는 텐던을 감아 손가락을 움직인다. 본 구조는 최소한의 부품으로 구동하여 경량화에 적합하고 텐던을 통해 손가락 끝까지 동력이 제대로 전달되어 무게 대비 높은 가반하중을 가진다.

Fig. 14 (a) ~ (c)는 중심 기어의 회전으로 맞물려 있는 기어의 회전 방향과 풀리의 상하부 실이 역방향으로 부착되어 손가락에 연결된 모습을 나타낸 사진이다. 풀리의 상부와 하부에 실이 역방향으로 연결된 이유는 손가락의 동작을 위함이다. 손가락이 안쪽이나 바깥쪽으로 굽혀지면, 손가락 기준 굽혀진 쪽 텐던의 길이는 줄어야 하고 반대쪽은 늘어나야 한다. 따라서, 풀리의 상부와 하부는 동시에 텐던을 감고 풀어야 하는데 중심 기어로 인해 회전은 풀리를 한 방향으로만 돌리기 때문에 상하부의 텐던이 감기는 방향을 역방향으로 하여 동시에 감기고 풀릴 수 있도록 한다.

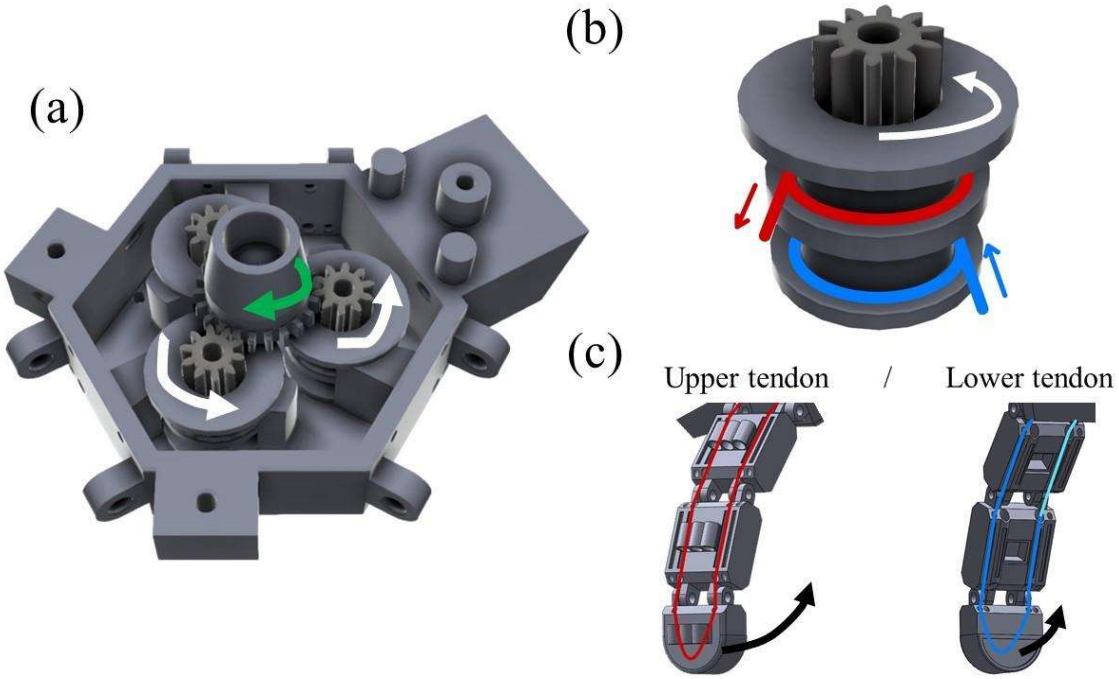


Fig. 14 (a) Direction of rotation of center gear and spur gear, (b) A pulley with two tendons wound in different directions, and (c) Paths of tendons connected to pulleys

3.3.2 적응형 파지

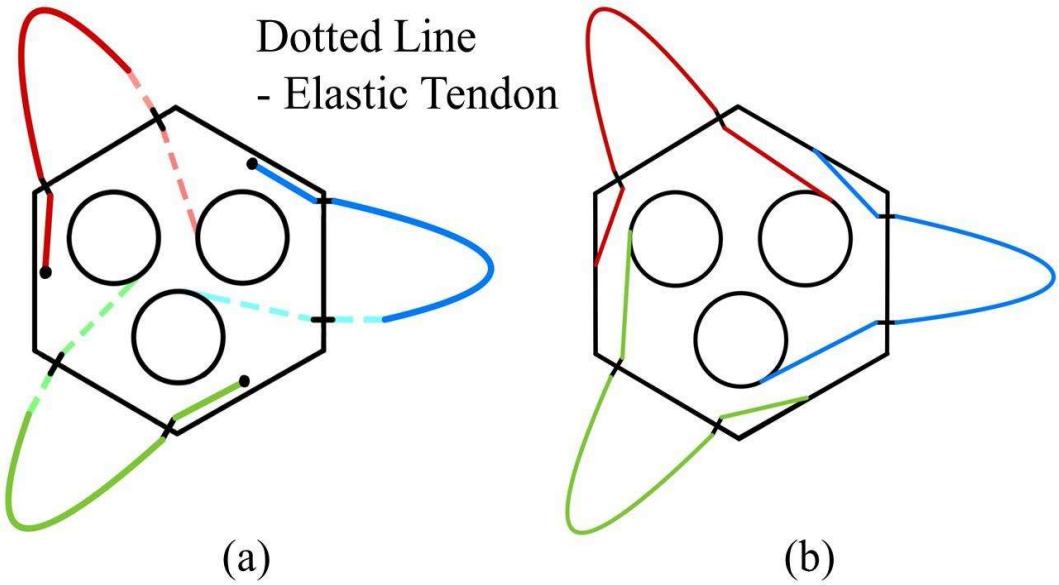


Fig. 15 (a) Lower tendon connection path, and (b) Upper tendon connection path in palm

앞선 부족 구동 방식은 개별 손가락이 동력 모터의 움직임에 따라 종속적으로 움직이는 구조로, 그리퍼를 기준 비정형 물체를 파지하기에 어려움이 있다. 예시로, 특정 손가락이 먼저 물체와 접촉해서 굽혀질 수 없으면 해당 풀리의 텐던을 더 이상 감지 못해 풀 리가 회전할 수 없고, 모터의 회전이 멈추게 되면 종속적으로 회전하던 다른 풀리들도 회전이 멈추어 다른 손가락도 움직일 수 없다. 이는 Design requirement의 '다양한 구조를 파지할 수 있는 구조'와는 맞지 않기 때문에 이를 해결해야 한다. 따라서,

손가락을 안으로 굽히는 데 강성이 서로 다른 탄성체와 비탄성체를 연결한 텐던을 사용한다. 이를 통해 각 손가락에 다른 부하가 걸릴 때 손가락끼리 서로 다른 움직임을 가져갈 수 있게 만든다. 이는 불규칙한 형상의 물체를 파지하며 손가락마다 가해지는 부하가 달라질 때, 손가락의 굽힘에 차이를 주어 형상에 적응하여 파지할 수 있는 적응형 파지가 가능하게 한다.

Fig. 15 (a), (b)는 풀리의 상하부에 텐던이 연결된 모습을 보여주는 사진이다. (a)는 풀리의 하부에 연결된 실, (b)는 풀리의 상부에 연결된 실의 모습이다. 풀리의 하부에는 탄성력이 있는 텐던과 일반 텐던이 연결된 것을 확인할 수 있다. 두 종류의 텐던이 연결된 이유는 설계 핵심 내용의 End effector에서 설명하였던 비정형 물체의 파지를 위함이다. 상부 역시 설계 핵심 내용에서 설명했던 것처럼 상부의 텐던은 물체의 형상에 따른 파지가 필요하지 않기 때문에 일반 텐던만을 사용했다. 이러한 구조로 인하여 본 그리퍼는 적응형 파지할 수 있게 된다.

3.3.3 인체 모방형 파지

Design requirement의 '물체 파지의 안정성'을 해결하기 위해선 손가락이 물체에 최대한 많이 접촉하여 물체를 잘 잡아야 한다. 또한, 접촉면의 마찰력을 높여 효과적으로 물체를 파지할 수 있어야 한다. 이를 위해서 본 설계에서는 사람 손이 물체를 잡는 과정과 비슷하게 손가락의 마디 별 움직임의 순서를 제한하고자 한다. 사람 손이 물체를 잡을 때 손바닥과 가까운 관절부터 손가락 끝에 가까운 관절 순으로 굽어지며 잡는다. 본 그리퍼에서 앞선 과정을 모방하기 위해 손가락 사이에 있는 관절마다 강성이 약한 탄성체를 손바닥과 가까운 관절에 부착하고 강성이 강한 탄성체를 손가락 끝과 가까운 관절에 부착한다. 최종적으로 각 관절이 굽어질 때 필요한 힘을 서로 다르게 제한함으로써 손가락의 관절이 굽어지는 순서를 지정했다.

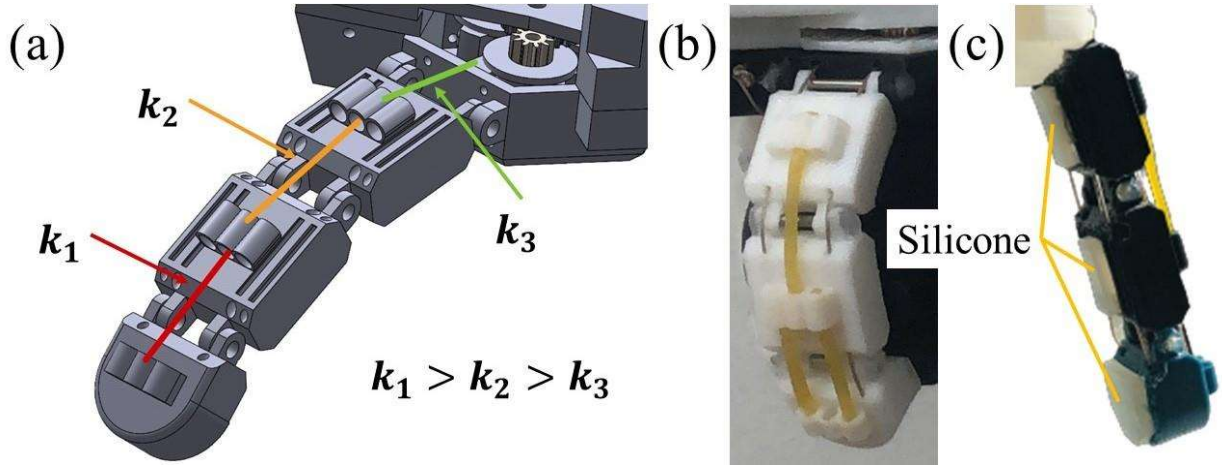


Fig. 16 (a) A finger joint with different stiffness, (b) Actual rubber band connections at joint, and (c) Silicone on the inside of the finger

Fig. 16 (a), (b)는 각각의 손가락 마디에 연결된 탄성체의 강성을 나타내는 사진이다. 탄성체가 없는 상태에서 풀리의 텐던이 손가락을 굽히면 손가락의 끝마디부터 굽혀진다. 하지만, 파지를 원활하게 하기 위해서는 사람이 물체를 잡을 때와 비슷하게 손바닥에 가까운 마디부터 굽혀져야 한다. 이를 위해 강성이 20.4N/m인 고무줄을 손바닥과 가까운 관절부터 끝에 있는 관절 순서대로 0, 1, 2개씩 병렬로 연결하여, 손가락이 굽혀질 때 강성이 낮은 관절이 먼저 굽혀지고, 차례대로 다음 관절이 굽혀지도록 설계하였다. 또한, Fig. 16 (c)처럼 손가락 안쪽에 실리콘을 부착하여 물체와 접촉하는 면의 마찰력을 향상했다.

3.2.4 모터 하우징과 수평 유지 장치

그리퍼에 사용되는 모터는 하우징에 의해 앞선 구조와 연결되어 그리퍼를 작동시켜야 한다. 따라서 Fig. 17과 같이 모터 하우징을 제작하였다. 모터 하우징의 하부는 손바닥과 나사로 체결되어 그리퍼와 연결되는 구조를 가지며, 상부는 상황에 따른 모터 교체를 위해 쉽게 개폐할 수 있는 구조를 가진다.

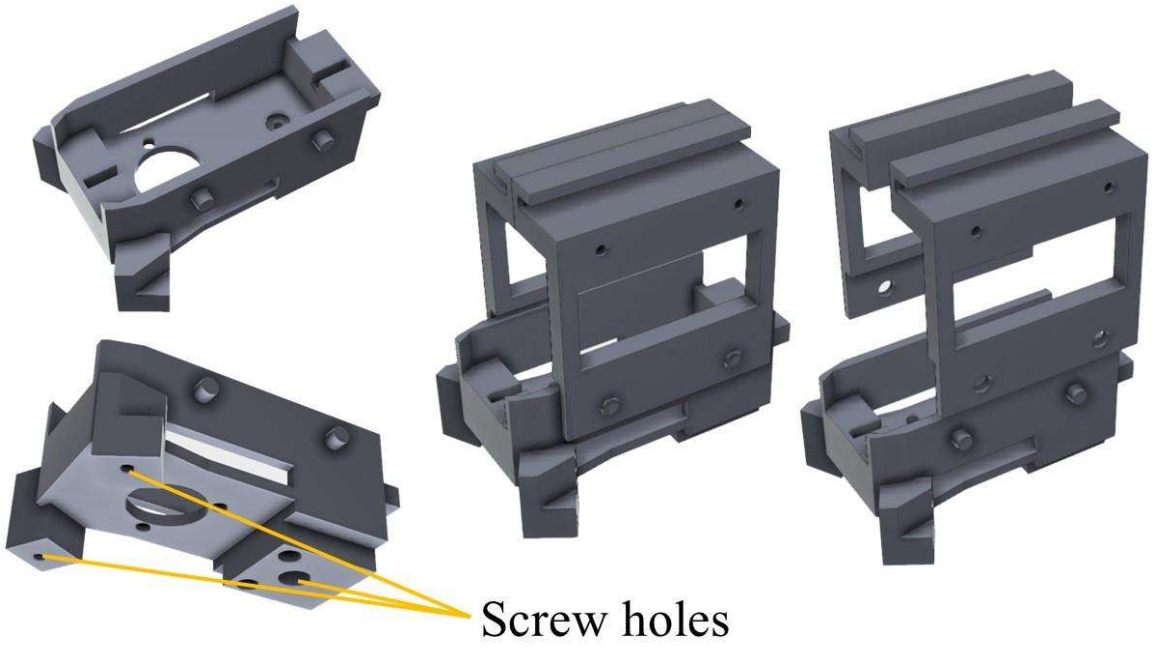


Fig. 17 Motor housing

로봇청소기의 사용 환경이 주로 바닥 등 평평하고 넓은 지역이기에 로봇청소기에 적용되는 본 그리퍼 역시 바닥에 있는 물체를 파지해야 한다. 하지만, 그리퍼가 꺾이거나 균형을 잡지 못하고 있으면 그리퍼가 파지하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이는 그리퍼가 목표 지점 도달 후 파지할 때, 그리퍼가 기울어져 그리퍼의 파지 지점과 물체 간 정렬이 맞지 않게 되고, 이에 따라 각 손가락이 파지하는 정도의 차이가 생겨 발생하는 문제였다.

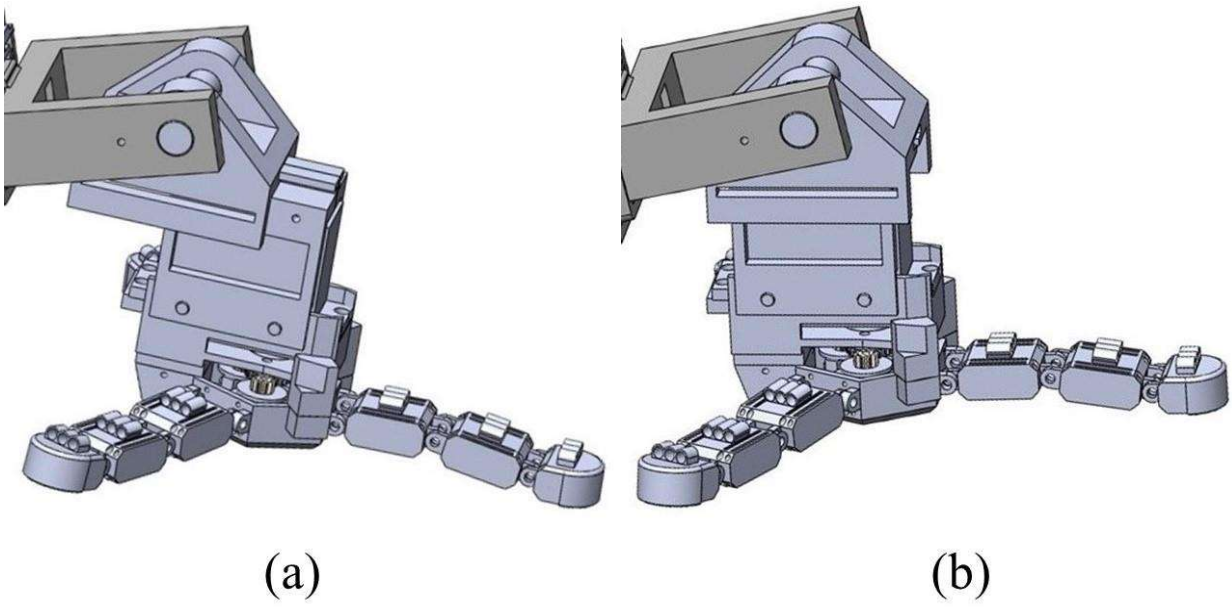


Fig. 18 A horizontal holding device in (a) leaned state and (b) horizontal state

이 문제를 해결하기 위해선 손가락별로 걸리는 파지 하중이 최대한 균형을 이루어야 한다. 따라서 물체의 하중이 각 손가락에 일정하게 작용해야 하고, 로봇청소기의 사용 환경 특성을 종합하면 그리퍼의

손바닥이 지면과 평행을 유지해야 한다는 결론이 나온다. 이를 위해서 Fig. 18 (a), (b)처럼 그리퍼의 수평을 유지할 수 있는 수평 유지 장치를 제작하였다. 로봇팔과 이 장치가 연결되는 지점에서 그리퍼의 무게 중심점까지 연결하는 가상의 직선이 중력과 평행하도록 조절한 후 고정하면 수평을 유지할 수 있는 구조로 설계했다. 그리고 그리퍼는 로봇팔에 부착이 되어야 하므로 그리퍼 위에 부착되는 수평 유지 장치와 로봇팔 끝부분에 결합을 위한 구멍을 만들었고, 원기둥의 막대를 삽입하여 결합할 수 있도록 만들었다. 최종적으로 그리퍼가 로봇팔에 부착되어 물체가 있는 위치까지 이동하여 물체를 파지할 수 있게 해준다.

3.4 문제점 보완

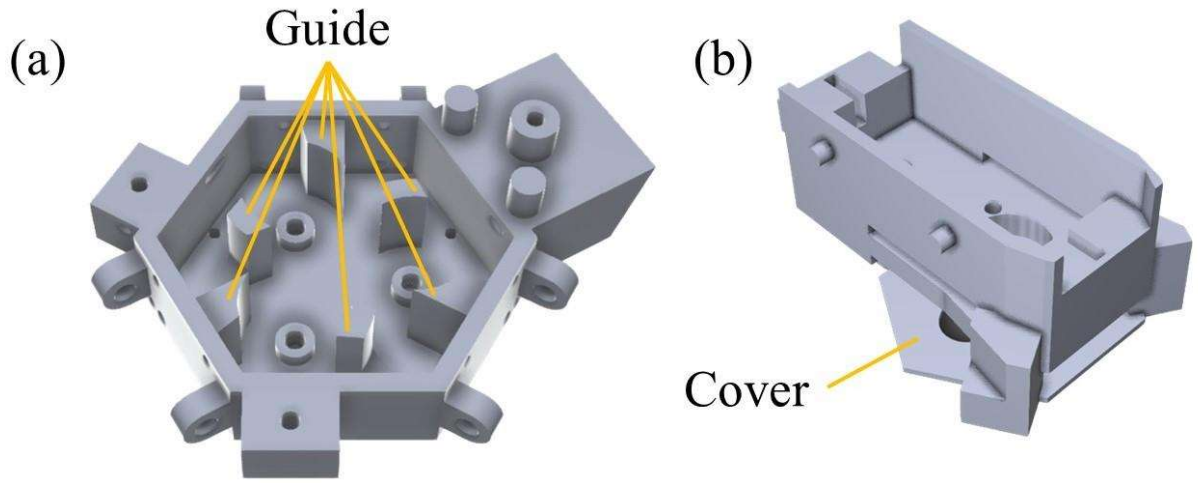


Fig. 19 (a) Guide pillar in palm, and (b) Palm cover on the underside of the motor housing

앞서 설명했던 구조로 그리퍼를 제작하고 구동하니, 내부 텐던이 풀리에 제대로 감기지 않는 문제가 발생하였다. 반복적으로 구동하여 원인을 확인한 결과 해당 문제는 풀리의 회전으로 인해 텐던이 느슨해지면서 풀리 밖으로 벗어나는 것이었다. 이를 해결하기 위해 Fig. 19 (a)처럼 손바닥 내부에 풀리와 텐던이 위치하는 곳이 아닌 부분에 가이드 역할의 벽을 설치하여 텐던의 이동 경로를 제한함으로써 풀리에서 텐던이 이탈하는 문제를 방지하였다.

하지만, 가이드를 추가한 이후에도 상부 텐던이 풀리 위로 빠지거나 하부 텐던이 풀리 아래로 빠지는 경우가 발생했다. 해당 원인 역시 확인한 결과, 제작과정 중 풀리에 스퍼기어를 연결하거나 모터에 중심 기어를 연결하면서 생긴 미세한 정도의 비틀림에 의해 중심 기어와 스퍼기어가 맞물려 회전할 때 풀리의 한쪽 끝이 들리는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이 비틀림은 제작과정에서 생기는 오차였기에 개선할 수 없어 비틀림으로 인한 한쪽 끝이 들리는 것을 막는 구조가 필요했다. 따라서, Fig. 19 (b)처럼 손바닥 위쪽을 덮을 수 있는 덮개 구조를 추가하여 풀리의 한쪽 끝이 들리는 것을 막음으로써 해당 문제를 해결하였다.

3.5 전체 구조

Fig. 20 (a) ~ (c)는 현재까지 제작한 그리퍼이다. 전체에서 모터와 기어를 제외한 부품은 Solidworks를 이용하여 앞서 언급한 형상대로 설계하였고, 3D프린터에 ABS 필라멘트(밀도: 1.06g/cm^3)를 이용하여 각 부품을 출력한 후에 조립하는 방식으로 End effector를 제작하였다. 중심 기어는 STS 303 재질의 평기어(모듈: 2, 이빨 수: 22, 무게: 4g)를 사용했으며, 풀리의 스퍼기어는 황동 재질의 평기어(모듈: 2, 이빨 수: 10)를 사용했다. 풀리 회전축으로 STS 304 재질의 샤프트를 사용하였고, 텐던에는 일반실과 나일론 낚싯줄(5호)을 사용했다. 파지 대상과의 마찰력을 최대화하기 위해 손가락 안쪽에 실리콘을 부착하였다. 구동용 모터는 Dynamixel XM430-W350-T(82g)를 사용한다. 모터를 포함한 그리퍼의 전체 무게는 132g이다.

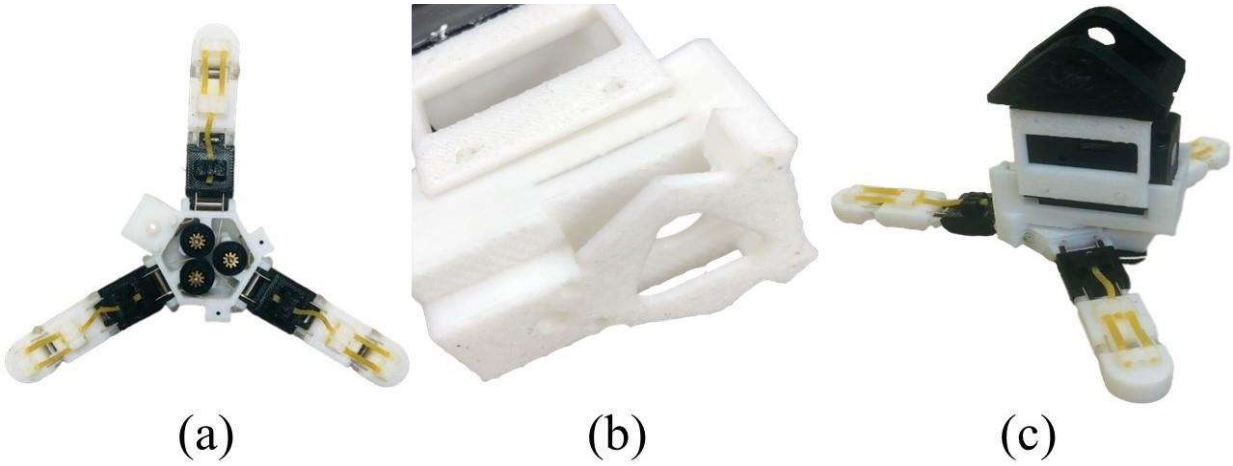


Fig. 20 (a) Inside of gripper, (b) Actual motor housing, and (c) Actual gripper

3.6 실험 및 성능 비교

제작된 그리퍼의 특성인 경량화 및 파지 기능을 검증하기 위해 다양한 형상의 물체 파지 실험을 수행하였다. 이후 제작한 그리퍼의 가반하중과 파지 과정에서 물체에 가해지는 힘과 파지까지 걸리는 시간을 측정하여 개발한 그리퍼의 성능을 검증하였다. 이 중 '파지력 실험'의 경우, 손가락이 물체에 가하는 힘을 최대한 정확히 측정하기 위해 Fig. 21 (a)처럼 그리퍼의 손바닥이 위를 바라보는 상태에서 측정했다. 나머지 실험의 경우, 외부 진동을 최소화하고 중력 가속도의 방향과 그리퍼의 손바닥이 향하는 방향을 일치시켜 각 손가락에 균일한 하중이 적용되기 위해 Fig. 21 (b)처럼 그리퍼를 고정하는 프레임 형태의 Testbed를 제작하여 실험에 적용하였다.

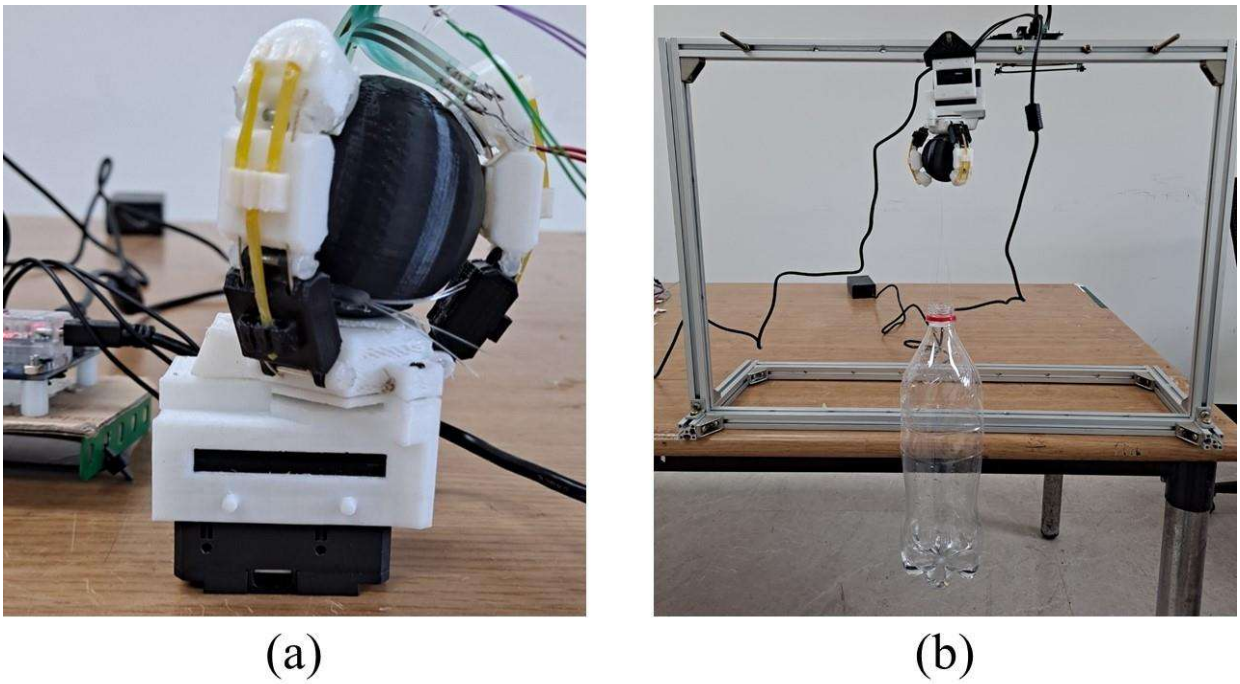


Fig. 21 Experimental setups of (a) Gripping force measurement test, and (b) Payload measurement test

3.6.1 다양한 형상의 물체 파지

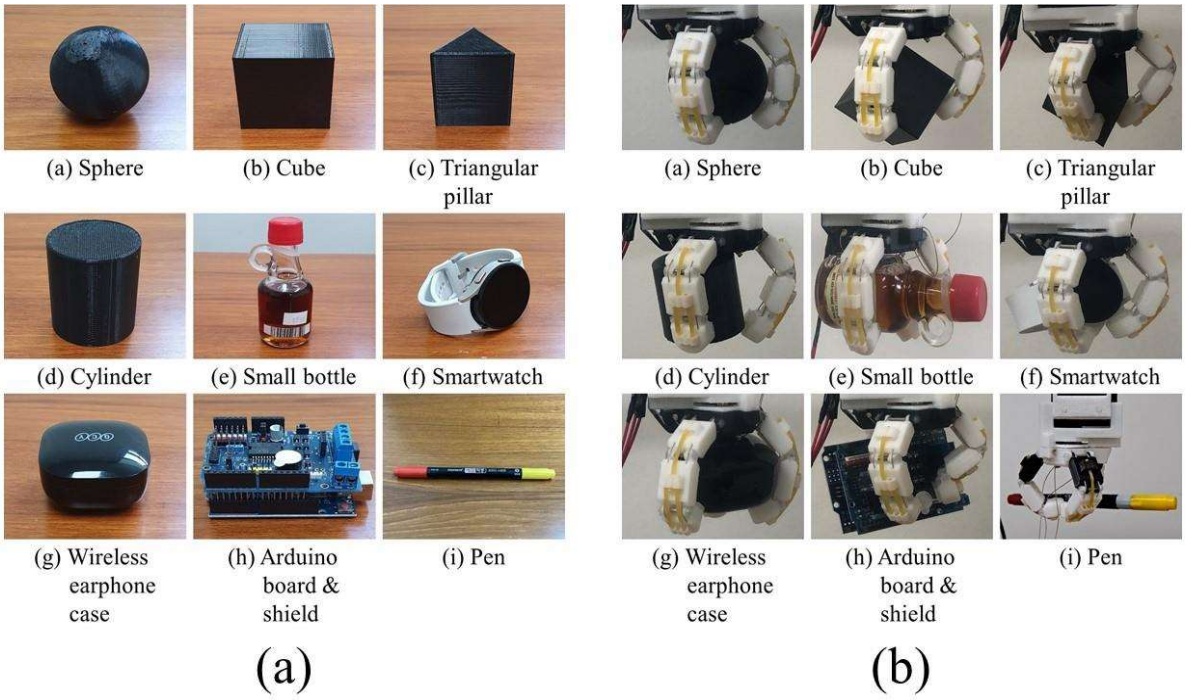


Fig. 22 (a) Various shapes, and (b) Grasping experiment with various shapes

그리퍼의 대상 물체는 로봇청소기의 흡입구에 걸려 오동작을 발생시키거나, 청소 경로상에 위치하여 청소에 효율을 떨어뜨릴 것으로 예상되는 5가지 물체와 서로 다른 형태의 다면체 4가지를 선정하였다. 다면체 물체 파지 성공 결과를 통해 형상이 유사한 물체들의 파지 가능성을 확인할 수 있었다.

Table 6 Sizes of various shapes(D: Diameter, L: Length, T: Thickness)

	Size	Mass(g)
Sphere	D: 40mm	20
Cube	L: 40mm	20
Triangular pillar	L: 40mm	10
Cylinder	D: 40mm / L: 40mm	15
Small bottle	D: 43mm(Body), 20mm(Neck) / L: 93mm	112
Smartwatch	D: 40mm / L: 10mm(Display), 2mm(Strap)	50
Wireless earphone case	$(53*53*29)mm^3$	45
Arduino board & shield	$(69*54*29)mm^3$	52
Pen	D: 7mm / L: 150mm	9

실험 결과 Fig. 22에서 나타난 바와 같이 총 9가지 형상에 대해서 안정적으로 파지하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 구형 이외의 비대칭 물체에 대해서 각 손가락이 다른 굽힘 각도로 형상을 안정적으로 파지하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 하부 텐던 탄성체의 동작으로 손가락이 굽혀지는 각도의 차이를 보상하고, 하나의 모터로도 파지 대상 물체의 형태에 따라 각 손가락의 적절한 움직임이 가능함을 확인했다.

3.6.2 가반하중 측정

가반하중을 평가하기 위해 Fig. 21 (b)와 같이 그리퍼가 파지한 물체에 물병을 연결하여 물병에 물을 추가하면서 그리퍼가 파지한 물체를 놓치는 순간의 하중을 최대 가반하중으로 판단하였다. 모터의 토크를 변화시키면서 토크별로 5회 실험했고, 그리퍼의 파지 물체는 세 손가락에 대칭으로 접촉하는 구형을 이용하였다. 가반하중은 그리퍼에 사용된 구와 병의 무게를 포함하였다.

Table 7 Average and standard deviation of maximum payload

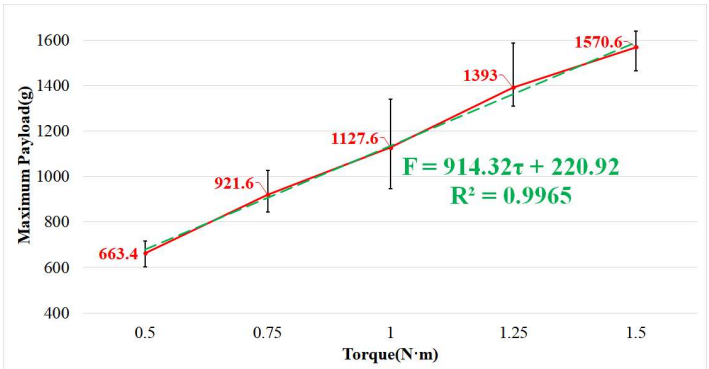


Fig. 23 Payload according to the motor torque

Load(g) / Torque	Average	S.D.
0.5Nm	663.4	44
0.75Nm	921.6	72.37
1.0Nm	1,127.6	155.94
1.25Nm	1,393	117.32
1.5Nm	1,570.6	68

모터 토크에 따른 가반하중은 Table 7 및 Fig. 23과 같다. 그리퍼의 무게가 132g이기 때문에 제작한 그리퍼의 무게 대비 가반하중을 비교하면 0.5 Nm에서 약 502%, 1.5 Nm에서 약 1,189% 정도의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 23에 나타난 바와 같이 가반하중 값은 모터 토크의 선형 방정식으로 추정할 수 있으며, 이 식을 활용하여 원하는 최대 가반하중을 위한 토크와 이를 위한 전류 제어 값을 결정할 수 있다. 해당 선형 방정식의 결정계수는 0.9965로 1과 매우 가깝기에 신뢰할 수 있는 1차 식이다. 그리퍼가 대상물을 파지하는 힘은 모터에서 발생하는 힘과 손가락 굽힘에 따라 발생하는 탄성체의 복원력 차이에 비례하므로, 모터 토크가 증가할수록 그리퍼와 파지 물체 사이의 마찰력이 증가하여 그리퍼의 가반하중을 증가하는 결과를 나타낸다.

3.6.3 파지력 실험

Table 8 Average and standard deviation of gripping force of all fingers

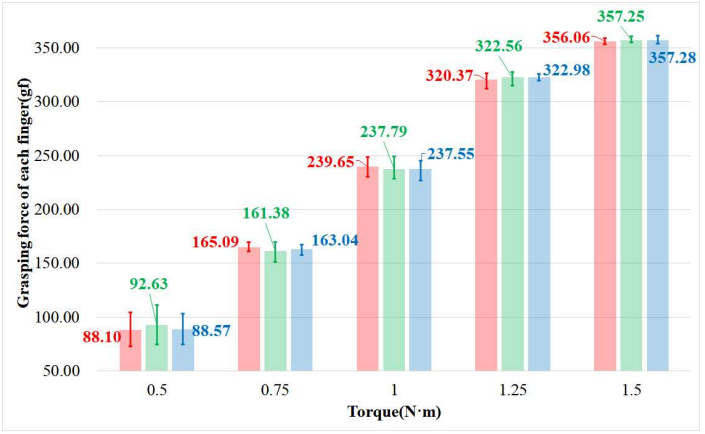


Fig. 24 The gripping force of each finger

Load(gf) / Torque	Average	S.D.
0.5Nm	89.76	2.49
0.75Nm	163.17	1.86
1.0Nm	238.33	1.15
1.25Nm	321.97	1.40
1.5Nm	356.86	0.70

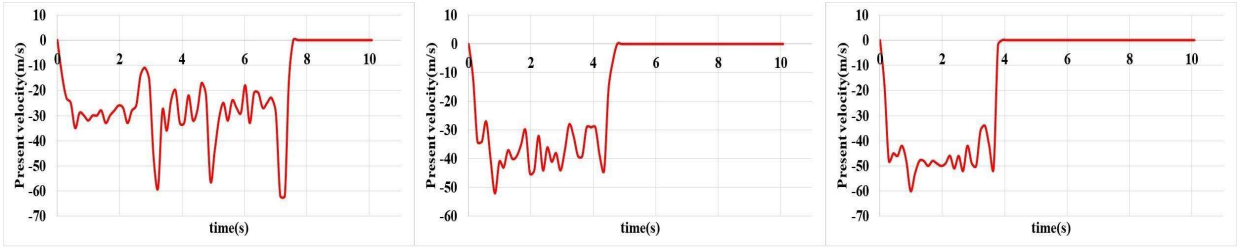
파손 없이 물체를 파지하기 위해서는 물체에 가해지는 힘을 조절해야 한다. 예를 들어, 파손에 약한 물체를 강하게 누르면 부서지기 때문에 파지 대상에 가해지는 힘을 측정하고 이를 수학적으로 추론한

후 제어에 이용하면 물체의 강도에 따른 안정적인 파지가 가능할 것이다. 각 손가락이 물체에 가하는 힘을 측정하기 위해 손가락 안쪽에 압력 센서(FSR19 Load Cell)를 부착하였고, Fig. 21 (a)와 같이 구형 물체에 대해 파지를 수행하였다. 모터 토크를 변화시키면서 토크별로 세 손가락에서 측정된 값들을 5회 측정하였다.

Table 8 및 Fig. 24는 토크별로 각 손가락의 파지력을 나타낸다. 0.5Nm ~ 1.5Nm의 범위에서 각 손가락당 파지력이 89.76gf ~ 356.86gf까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각 손가락에 가해지는 힘이 일부 차이는 있으나, 0.5Nm에서 측정된 힘을 제외하고는 무시할 수 있는 수준이다. 0.5Nm의 경우, 토크로 인한 힘과 탄성체의 복원력 차이가 크지 않아서 편차가 큰 것으로 추정된다. 그 외의 경우, 각 손가락에 가해지는 힘의 차이가 작은 것은 구형 물체를 잡는 과정에서 각 손가락이 물체에 가하는 힘의 대칭 정도를 나타내는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 본 그리퍼 구조는 균등하게 힘을 전달하여 안정적인 파지 동작을 구현할 수 있고 모터 토크에 따라 파지력을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

3.6.4 파지 시간 측정

본 그리퍼는 하나의 모터로 세 손가락을 동시에 제어하기 때문에 파지까지 걸리는 시간도 중요한 요소이다. 따라서 모터 작동 후 그리퍼가 물체를 완전히 파지하는 시간을 측정하였다. 실험에서는 토크 0.5Nm를 기준으로 텐던에 장력이 작용하지 않는 상태에서 모터를 각각 6.8rpm, 9.2rpm, 11.5rpm의 속도로 회전시켜 지름이 40mm인 구를 파지하는 데 걸린 시간을 측정하였다.



(a) 6.8 rpm (b) 9.2 rpm (c) 11.5 rpm

Fig. 25 The present velocity of the motor at each rpm

Fig. 25는 각 rpm에 따라 모터의 회전속도를 나타내는 그래프이다. 모터가 회전하다가 멈춘 것의 의미는 물체를 완벽히 파지해서 더 이상 풀리가 회전할 수 없다는 것이다. 따라서, 모터가 회전하기 시작한 시점부터 마지막으로 모터가 회전을 멈추는 시점까지의 시간이 그리퍼가 물체를 파지하는 데 걸린 시간이 된다. 실험 결과 6.8rpm일 때 7.6초, 9.2rpm일 때 4.5초, 11.5rpm일 때 3.6초의 파지 시간이 걸리는 것을 확인했다. 다만, 실제 그리퍼가 물체를 파지하기 위해 걸리는 시간은 물체 크기와 모터의 회전속도, 그리퍼의 초기 상태 등 다양한 환경적 요소에 영향을 받는다. 따라서, 정확한 시간보다는 토크가 높아질수록 파지 시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있었다고 볼 수 있다.

3.6.5 그리퍼 성능 비교

설계한 그리퍼가 다른 그리퍼보다 어떠한 점에서 좋은지 확인하기 위해 다른 그리퍼들과 비교하여 Table 9에 정리하였다. 본 설계의 그리퍼는 로봇청소기에 부착되어 가정환경에서 사용되기에 비교군에 속할 그리퍼도 본 설계의 그리퍼와 목적 및 크기 등이 비슷해야 한다. 따라서, 비교군의 그리퍼는 18g~540g 사이의 무게를 가지는 그리퍼로 선정했고, 비교 기준은 무게 대비 그리퍼의 가반하중을 중점으로 비교했다.

본 설계의 그리퍼는 무게 대비 약 11.89배의 가반하중을 가지고 있어 비교군에 비해 무게 대비 가반하중이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 이렇게 높을 수 있는 이유는 가벼운 '텐던-풀리' 구조와 모터 하나로 부족 구동이 가능한 구조이기 때문에 그리퍼의 무게가 가벼워졌고, 물체의 형상에 맞는 적응형 파지가 가능하기에 상대적으로 물체를 안정적으로 파지할 수 있게 되면서 그리퍼의 무게 대비 가반하중이 높은 것으로 추정된다.

Table 9 Comparison with other grippers

	Fingers (EA)	Adaptive grasping (O/X)	Weight (g)	Payload (gf)	Payload / Weight
Tendon-driven adaptive robot hand[10]	4	O	500	1000	2
Multi-joint fingers gripper[7]	2	O	450	275	0.61
Adaptive gripper with Magnetic gear[11]	3	O	492	3250	6.61
ReSoft Gripper[12]	3	O	540	1200	2.22
The Co-Gripper[13]	4	O	480	4750	9.9
Snake Robot Gripper[14]	3	O	400	2480	6.20
A Hybrid, Actively Compliant Gripper[15]	2	O	297	50	0.17
A Prestressed Soft Gripper[16]	4	O	278	75	0.27
An Adaptive Soft Gripper for Fruit Harvesting[17]	4	O	253	1471	5.81
versatile 4-DOF robotic gripper[18]	2	O	200	2200	11
Compliant design gripper[19]	2	O	160	1280	8
The Soft-Sixth Finger[20]	1	O	140	1400	10
Gripper for Stroke Patients[21]	1	O	124	610	4.92
Lightweight Bionic Robotic Arms[22]	3	O	18	180	10
This Study	3	O	132	1570	11.89

4. 로봇팔

4.1 설계 문제 정의

쓰레기 및 물체의 전방까지 이동하는 것은 차체의 역할이라면, End effector를 수거 대상 물체의 바로 근처까지 이동시키는 것은 로봇팔의 역할이다. 본 설계에서의 로봇팔은 로봇청소기가 주행하는 동안 주변 물체들과 충돌을 방지하기 위해 수거 동작을 수행하기 전에는 부피를 최소화하고, 대상 물체까지 이동하는 동안에는 행동 범위가 최대한 주변 환경에 영향을 주지 않아야 한다.

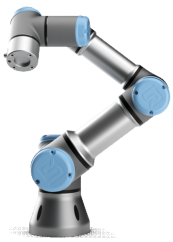
물체까지 End point 이동 정확도를 높이기 위해 그리퍼 자체 무게로 인한 로봇팔 구조의 처짐이 미치는 영향을 확인해야 한다. 또한, End effector와 무거운 물체를 들기 위해 각 관절에 요구되는 모터 사양을 고려해야 한다. 위 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 물체 위치까지 이동하기 위한 충분한 자유도가 있어야 한다.
(2) 수거 동작을 하는 동안 행동반경이 작아야 한다.
(3) 수거 동작을 하지 않을 때는 부피를 최소화해야 한다.
(4) 그리퍼 무게로 인한 로봇팔의 처짐이 미치는 영향을 파악해야 한다.
(5) 무거운 물체를 잡고 옮기기 위한 충분한 힘을 낼 수 있는 관절 모터가 요구된다.

4.2 개념 설계

로봇팔의 설계 문제를 정의하며 요구조건으로 수거 동작 시, 충분한 자유도와 작은 행동반경, 수거 동작을 하지 않을 때의 부피 최소화를 언급하였다. 이를 수행하기 위한 로봇팔의 다양한 방식들을 조사한 결과, 3-관절 로봇팔(R-R-R 구조), 타워 크레인(R-P-P 구조), 붐 크레인(R-R-P 구조) 방안을 후보로 선정하였다(영문자 P는 직선 운동(Prismatic), R은 회전 운동(Rotation)을 나타낸다). 그 후 구동 범위, 차지하는 부피, 이동의 정확성 측면에서 각각의 방식을 Table 10과 같이 분석한 결과 붐 크레인 구조가 조건에 가장 적합하다고 판단하여 해당 구조를 채택하였다.

Table 10 Comparison of robot arm structures(3 points for perfect score in each criterion)

	 **Fig. 26** 3-joint Robot Arm	**Fig. 27** Tower Crane	**Fig. 28** Crane Boom
구동 범위가 작은가?	1	2	3
차지하는 부피가 작은가?	2	1	3
정확한 이동이 가능한가?	3	1	2
총점	6	4	8

붐 크레인 구조의 대표적인 예시는 차량 위에 부착되어 사용되는 것이다. 하지만, 해당 예시의 공통점은 붐 크레인이 위로 움직인다는 것이다. 하지만, 로봇청소기의 상판에 부착되는 로봇팔의 위치가 로봇청소기 전방에 놓여있는 물체의 위치보다 높기에 붐 크레인이 위로 향하지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, 로봇청소기에 부착되어 지면에 있는 물체를 잡는다는 것을 고려하여 새로운 붐 크레인 구조를 적절하게 설계해야 한다. 따라서, 해당 문제 및 다른 설계 요소를 고려하여 Design requirement와 specifications를 Table 11에 작성했다.

Table 11 Design requirement and Design specifications of robot arm

Design requirement	Design specifications		
붐 크레인 구조	도달 가능 범위	~ 250mm	물체 인식 후 수거 동작이 가능한 범위와 수거 동작 시 행동반경 고려
지면으로 향할 수 있는 회전각도	붐 개수	4개	평상시 부피 최소화 및 물체 수거 동작 시 길이 증가를 위한 개수
수거 동작의 간소화	0단 붐 길이	120mm	로봇팔의 수직 위치 및 도달 가능 범위를 고려하여 로봇팔이 늘어나야 하는 길이 고려
수거 대기 시 부피 최소화	n단 붐 길이 (n=1, 2, 3)	70mm	

로봇팔의 도달 가능 범위는 수거 대상 물체가 약 40mm 내외의 크기를 가지고 있기에 물체 인식 장치가 이를 충분히 식별할 수 있는 범위와 로봇팔의 수거 동작 시 행동반경이 로봇청소기 크기에 대비하여 큰 차이가 생기지 않는 범위를 고려하여 수평거리가 250mm 정도까지 늘어날 수 있도록 설계하였다. 또한 로봇팔이 평상시에는 부피가 최소화되지만, 물체를 수거할 때는 충분한 길이까지 증가할 수 있도록 붐의 개수를 총 4개로 제작하였다. 각 붐의 길이는 차체 전방 기준 도달 가능 범위와 지면으로부터 닿을 수 있는 수직 높이, 차체 상판에서의 로봇팔 부착 위치를 고려하여 결정하였다. 단, 0단 붐 내부에는 로봇팔의 길이를 조절하는 모터가 위치하기에 다른 단보다 길게 설계하였다.

4.3 구조 설계

4.3.1 로봇팔 각도 조절

로봇팔은 차체 상판의 앞부분에 배치하며, 로봇팔의 최종 목표는 End effector를 수거 대상 물체의 위로 이동시키는 것이다. 하지만, 위에서 채택한 붐 크레인 구조의 경우 길이를 조절하는 기능만을 가지고 있어 정교한 위치 조정을 위해 상하좌우로 회전하는 기능을 추가해야 End effector를 목표 위치로 움직이는 3 관절 R-R-P 구조를 만족시킬 수 있다. 이를 위해서 Fig. 29와 같이 붐 크레인 아래에 좌우로 회전하는 모터와 상하로 회전하는 모터, 그리고 이를 고정하기 위한 모터 하우징을 추가한다.

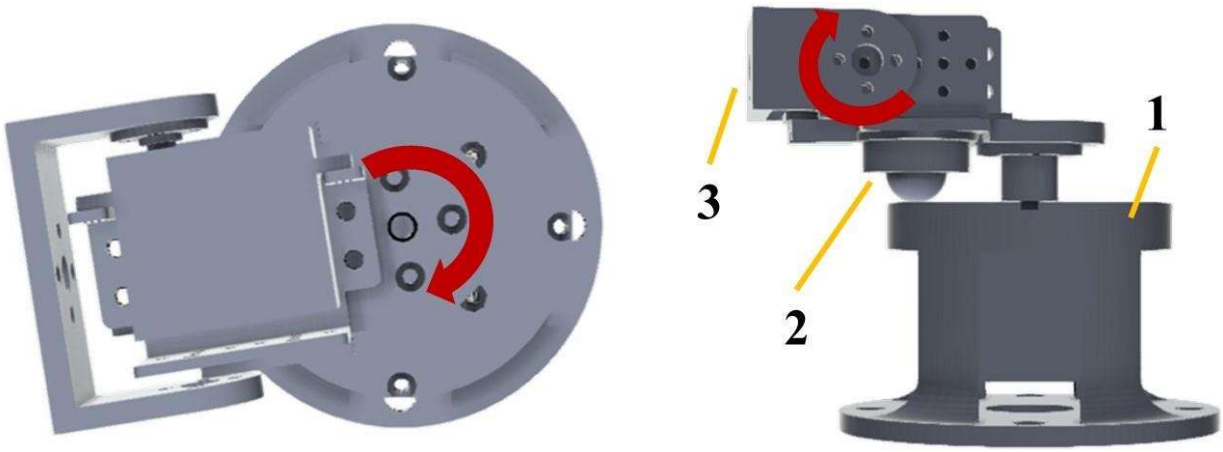


Fig. 29 Motor case and Revolution joint structure

로봇팔의 좌우 각도를 조절하는 스텝모터는 Fig. 29의 1번의 하우징 안에 위치하며, 하우징은 차체 상판과 나사 체결로 고정된다. 하우징 위로 올라온 스텝모터의 회전축은 상하 각도를 조절하는 서보 모터가 위치한 플랜지와 베이스 판을 좌우로 360° 회전시킨다. 이때, 회전축이 부담하는 로봇팔과 서보 모터의 무게를 줄이고 좌우 회전이 부드러울 수 있도록 Fig. 29의 2번과 같이 하판에 볼베어링을 부착했다.

다음으로 상하 각도를 조절하는 서보 모터와 로봇팔을 연결하는 이음부 부분이다. 서보 모터는 스텝

모터 바로 위에 배치했다. 서보 모터와 이음부 부분은 Fig. 29의 3번과 같이 Revolution Joint로 연결되어 있다. 따라서 서보 모터의 작동에 따라 로봇팔이 상하 180°로 회전할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 설계 문제에서 제시된 로봇팔의 자유도를 확장, 위치 제어가 가능하게끔 하였다.

4.3.2 로봇팔 길이 조절 - 붐 크레인

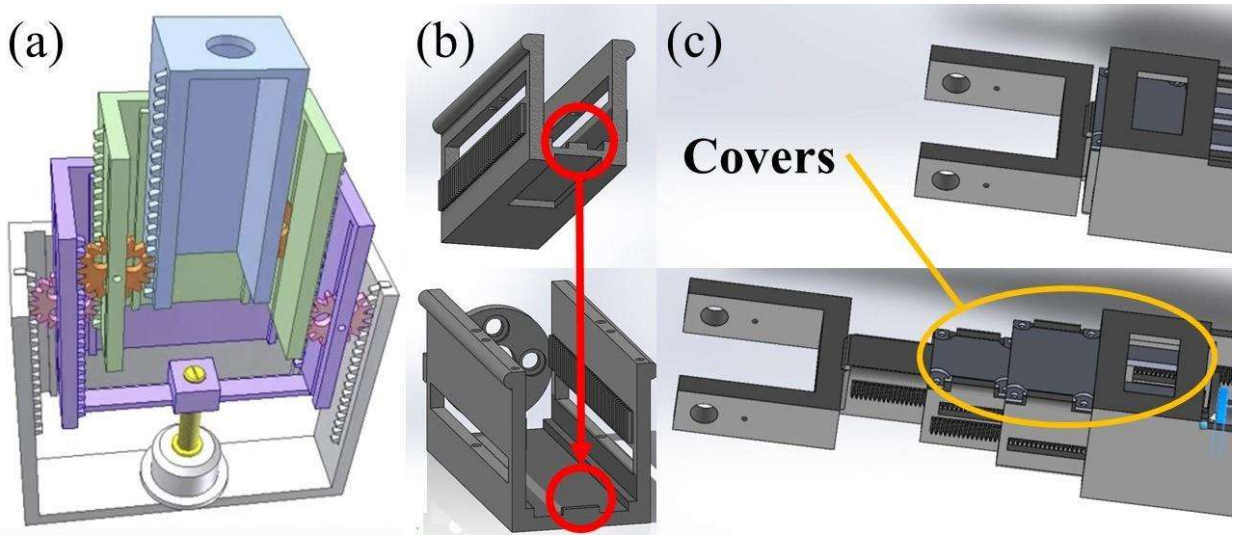


Fig. 30 (a) Boom crane structure used in this design[23], (b) Bottom block of robot arm, and (c) Designed robot arm length adjustment section

상하좌우 각도 및 방위 설정 후, 로봇팔의 길이가 늘어나서 End effector가 수거할 물체의 위쪽으로 이동해야 한다. 본 설계에서는 로봇팔의 길이 조절을 위하여 붐 크레인 구조로 길이 조절부를 설계하였다. 붐 크레인 구조는 Fig. 30 (a)처럼 각 단의 양쪽 벽면 중앙에 피니언 기어가 회전할 수 있게 고정되고 피니언 기어와 맞물릴 랙 기어가 각 단의 안쪽과 바깥쪽에 자리한 구조이다. 왼쪽 그림의 하단 중앙에 있는 나사산 스텝모터가 회전하면서 플랜지를 밀어내면 1단 붐(보라색)이 움직이고, 1단 붐에 고정된 피니언 기어가 위로 움직이며 맞물린 0단 붐(회색)의 랙에 의해 회전한다. 1단의 피니언이 회전하면서 맞물린 2단 붐(초록색)의 랙에 의해 2단 붐이 위로 움직인다. 같은 원리로 2단 붐에 고정된 피니언 기어가 위로 움직이며 맞물린 1단의 랙에 의해 회전하고, 이에 따라 3단 붐(파란색)의 랙에 의해 3단 붐이 움직이면서 끝점이 움직이게 된다.

길이 조절부는 개념 설계에서 제시했던 3단 붐 크레인 구조(0단 포함 단의 개수는 총 4개)로 설계하였다. 3단 붐 크레인의 구조적 특성으로 첫 번째 단을 밀어낸 길이의 3배 길이만큼 끝단이 밀려 나오게 된다. 이때 내부의 나사산 스텝모터가 회전하면서 플랜지에 부착된 1단을 밀어내게 되고 이어서 내부의 랙 & 피니언 구조에 의해 결과적으로 3단 붐 크레인 구조를 종속적이고 연속적으로 늘어나도록 하였다.

다만, 본 구조는 1단의 피니언 기어가 랙 기어를 이탈하면 3개 단 구조가 종속적으로 움직일 수 없게 되는 한계가 있다. 따라서, 로봇팔의 각 붐이 중간까지만 움직이도록 최대 확장 길이(105mm, End effector의 수평 유지 장치와 연결되는 지점까지는 150mm)를 제한하여 작동 시 발생할 수 있는 문제를 방지해야 한다. 따라서, Fig. 30 (b)처럼 단마다 하부에 턱을 만들어서 일정 거리 이상 늘어날 수 없도록 제한을 두었다. 또한 길이가 늘어난 상태에서 무거운 물체를 잡으면 각 단이 이탈할 수 있기에 Fig. 30 (c)처럼 단마다 상단에 덮개를 부착했다.

4.4 전체 구조

전체 구조는 Fig. 31 (a)와 같다. 상하좌우 회전이 가능하도록 로봇팔과 차체가 연결되는 지점에 1개의 스텝모터와 1개의 서보 모터를 위치시켰다. 상하 회전을 담당하는 서보 모터 앞에는 붐 크레인 구조에 동력을 가하는 스텝모터를 위치시켜 길이를 조절하면서 최종적으로 R-R-P 구조가 완성된다. 로봇팔의

회전은 앞선 Fig. 29처럼 조절되고, 길이는 Fig. 30 (c)의 위의 상태에서 아래의 상태로 변하는 형태로 조절된다. 제작품의 모습과 그리퍼까지 연결한 모습은 Fig. 31 (b)와 같다.

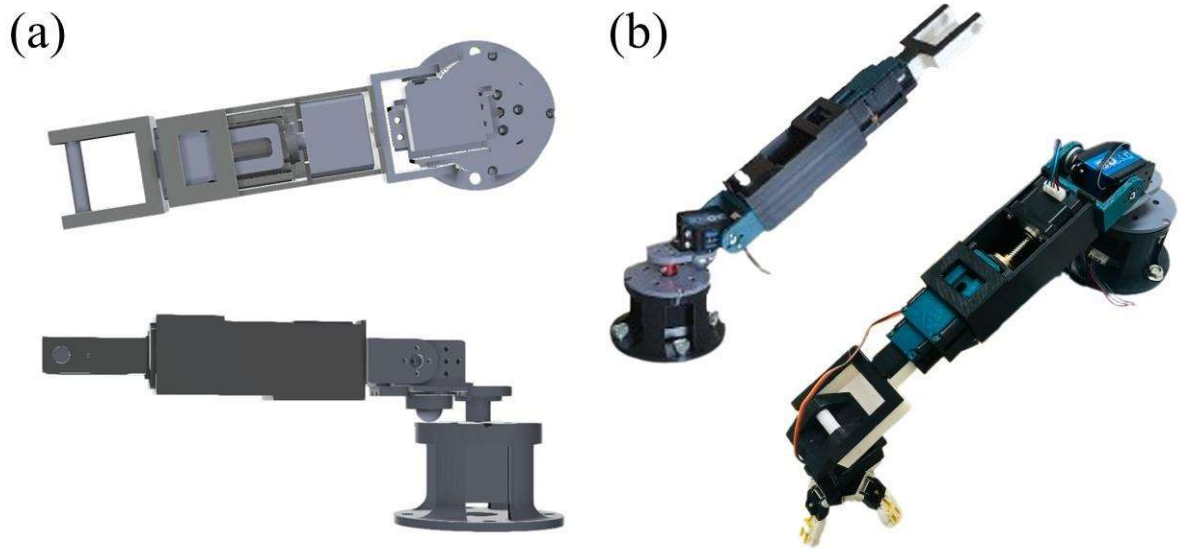
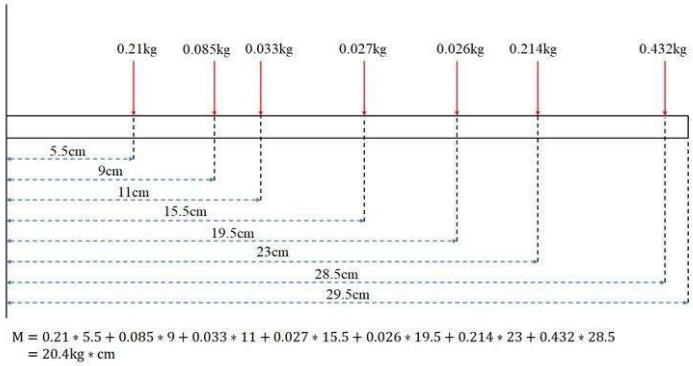


Fig. 31 (a) Structure of robot arm, and (b) Actual robot arm

4.5 모터 토크

상하 방향 각도를 조절하는 서보 모터는 길이를 조절하는 스텝모터와 프리스매틱 로봇팔의 각 단의 무게와 그리퍼, 그리퍼가 파지한 물체 등으로 인해 발생하는 토크보다 큰 토크를 발생시킬 수 있는 서보 모터를 사용하여야 한다. 각 부품이 서보 모터에 작용하는 토크를 계산해서 서보 모터를 선정하였다.

Fig. 32와 같은 토크 계산을 통하여 20.4kg*cm 이상의 토크를 발생시킬 수 있는 서보 모터를 사용해야 한다는 것을 볼 수 있다. 따라서 30kg*cm의 모터 토크를 발생시킬 수 있는 서보 모터를 사용했다.



(a)

Motor Specification (LW-30MG)	
Operating Voltage	4.8 ~ 7.2 DC Volts
Weight	62 g
Bearing Type	Ball Bearing x 2
Motor Type	DC Motor
Gear Type	Copper & Aluminum
Operating Temperature	-20°C~60°C
Working frequence	1520μs / 333hz
Size	40.5 x 20.5 x 39.3 mm

	4.8V	6.0V	7.2V
Torque	18.0 kg-cm	23.5kg-cm	30.0kg-cm
Speed	0.18 sec	0.16 sec	0.14 sec

(b)

Fig. 32 (a) Motor torque calculation and (b) Motor specifications

4.6 구조 해석

4.6.1 최대 응력 해석

Fig. 31 (a)와 같이 로봇팔의 전체적인 형상을 설계하고 제작하였지만, 해당 구조가 물체를 파지하는 과정을 안정적으로 견딜 수 있는지 확인할 필요가 있다. 따라서, 차체와 같이 Ansys 구조해석으로 구조

의 안정성을 확인하였다. 로봇팔의 재질은 ABS(항복강도: 약 27.44MPa)로 설정하였다. 경계조건은 가장 밑 부분과 서보 모터가 로봇팔과 체결되는 부분을 Fixed 하였고, 로봇팔의 개별 봄, End effector와 End effector가 파지 한 물체의 최대 무게(300g)를 끝단에 중력 방향으로 하중을 작용시켜 구조해석을 진행하였다.

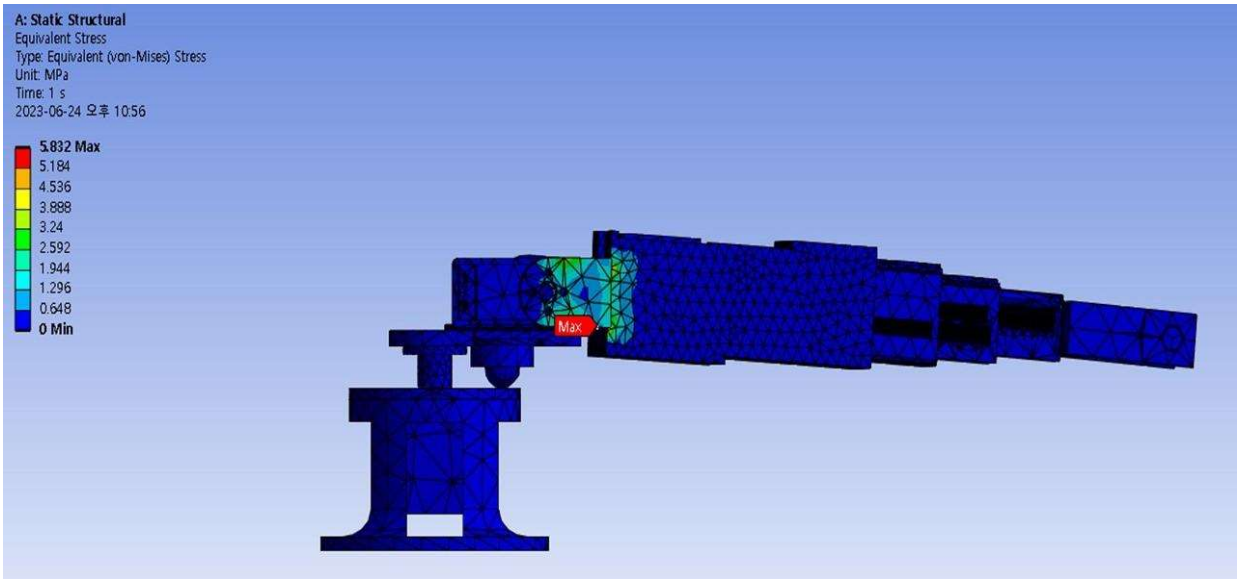


Fig. 33 Ansys result of robot arm

Fig. 33은 그리퍼가 최대 무게를 파지하였을 때의 등가 응력을 확인한 모습이다. 로봇팔의 최대 응력은 상하 각도를 조절하는 서보 모터와 팔이 연결된 Revolution joint에서 약 5.832MPa 정도 발생하였다. ABS의 항복강도를 고려했을 때 본 구조의 안전계수는 약 4.7 정도이므로 안정적인 것을 확인했다.

4.6.2 변형량(처짐) 해석

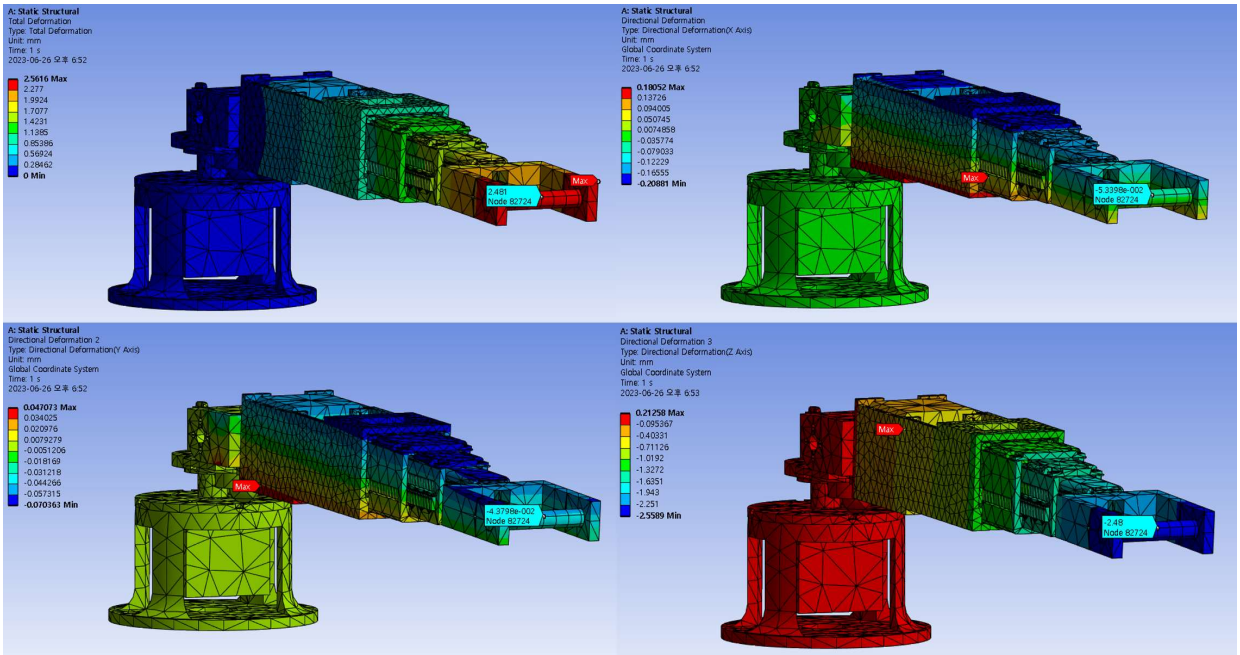


Fig. 34 Ansys of robot arm deformation

로봇팔이 동작하고 End effector가 물체를 수거하는 과정에서 로봇팔과 End effector가 연결되는 부분의 변형량은 End effector가 물체 위에 정확히 위치하는 것에 영향을 미칠 것이다. 따라서, 해당 부분의 변형량은 추후 End effector의 목표 위치를 설정하는 과정에서 중요한 요소이기 때문에 구조 해석으로 변형량을 확인하였다. 경계조건은 바닥과 접하는 하단 부분을 fixed로 설정하고, 하중 조건은 각 단의 무게와 그리퍼의 무게로 설정하여 변형량에 대한 구조해석을 진행하였다.

물체를 파지하지 않았을 때 로봇팔의 변형량에 대해서 구조를 해석한 결과는 Fig. 34와 같다. 결합하는 부분의 변형량을 확인했을 때 Total 변형량은 2.481mm, x 방향 $5.3*10^{-2}$mm, y 방향 $4.4*10^{-2}$mm, z 방향 2.48mm로 나왔다. x, y 방향으로는 하중이 작용하지 않으므로 매우 작은 변형량이 발생하기 때문에 고려하지 않아도 된다고 판단된다. z 방향 변형량은 2.48mm이므로 추후 파지 동작에 대한 높이 목표 위치 계산에서 해당 변형량을 고려하여 목표 위치의 높이를 계산해야 한다.

5. 동작 및 제어 메커니즘

5.1 설계 문제 정의

본 로봇청소기는 자율주행 중에 경로를 막는 물체가 있을 때 수거할 수 있는 물체라면 정지해서 수거하고 수거할 수 없는 큰 물체라면 우회해서 피해야 한다. 따라서 전방에 물체를 식별할 수 있는 장치와 자율주행을 하며 경로상에 큰 물체를 우회하는 기능이 필요하다. 그리고 물체 식별 장치와 로봇팔, 자율주행 장치가 서로 데이터를 주고받기 위한 통신 수단이 있어야 한다.

<물체 식별 장치>

(1) 물체를 배경으로부터 분류할 수 있어야 한다.
(2) 물체 부피 및 면적을 계산해서 수거 대상 기준을 평가할 수 있어야 한다.
(3) 로봇팔이 물체까지 이동할 수 있도록 물체의 3차원 좌표를 구해야 한다.
(4) 물체가 로봇팔이 도달할 수 있는 범위 안에 있는지 평가해야 한다.

<자율주행>

(1) 주어진 경로를 따라 자율주행으로 움직일 수 있어야 한다.
(2) 자율주행 중 수거할 수 있는 물체가 식별되면 자율주행을 멈추고 물체 수거가 끝날 때 다시 시작해야 한다.
(3) 반대로, 자율주행 중 수거할 수 없는 물체라면 멈추지 않고 우회해야 한다.

5.2 통신 방법

수거가 가능한 로봇청소기 시스템은 물체 식별 장치와 로봇팔, 자율주행을 하기 위한 각종 센서와 모터들이 서로 데이터를 주고받으며 동작한다. 통신 방법은 로봇 운영 체제(Robot Operating System, ROS)를 사용했다. 로봇 운영 체제(ROS)는 노드(node)라는 독립된 실행 단위로 시스템을 모듈화하고 개발할 수 있다. 이를 본 설계 제품에 적용하면 전체 시스템을 물체 식별 노드와 로봇팔 제어 노드, 자율주행과 관련 노드로 나누어 'Publisher-Subscriber' 구조로 데이터가 담긴 토픽을 실시간으로 수신하고 발행하며 각 시스템에 필요한 동작을 수행하게 할 수 있다.

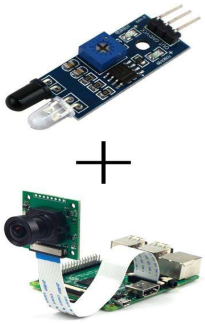
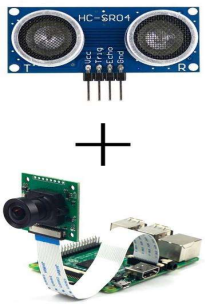
또한, 자율주행에 필요한 다양한 센서 장치를 쉽게 통합할 수 있는 도구와 라이브러리를 제공한다. 예를 들어, 자율주행에 사용되는 IMU Sensor나 Lidar 같은 장치들을 운용하기 위한 기본적인 라이브러리가 존재하며 자율주행에 필요한 다양한 기능이 담긴 Move_Base 패키지를 통해 로봇청소기의 자율주행을 구현할 수 있다. ROS 버전은 높은 범용성으로 위에서 언급한 것들을 활용할 수 있는 환경이 조성된 Ubuntu 18.04 Melodic을 사용했다.

5.3 수거 동작 메커니즘

5.3.1 물체 인식 장치 선정

설계 문제에서 정의한 것처럼 물체 식별 장치는 물체를 구별할 수 있어야 한다. 식별된 물체는 그리퍼가 잡을 수 있는 크기인지 평가하기 위한 부피 또는 면적을 계산할 수 있어야 하고 로봇팔을 물체까지 이동시키기 위한 3차원 좌표를 구할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 고려하여 물체 인식 장치를 선정하기 위해 물체를 식별할 수 있는 4가지 센서 조합에 대해서 3가지 평가 항목을 기준으로 평가했으며 가장 높은 점수를 얻은 Depth camera를 물체 인식 장치로 선정했다.

Table 12 Comparison of object recognition device(3 points for perfect score in each criterion)

	Fig. 35 Depth camera	 **Fig. 36** Camera + IR sensor	 **Fig. 37** Camera + Ultrasonic sensor	**Fig. 38** Camera + Lidar
배경과 물체의 구별 여부	3	3	3	3
물체 부피 및 면적 계산	2	0	0	1
물체의 위치 계산	3	2	2	2
총점	8	5	5	6

Depth camera는 실시간 이미지상에서 보이는 물체의 실제 깊이 정보를 구할 수 있는 카메라이다. Depth camera 종류 중 Intel Realsense Camera는 해당 카메라를 사용하는 개발자를 위한 소프트웨어 개발 키트(Software Development Kit, SDK)를 제공하여 깊이 데이터 처리 및 분석을 간소화하고 가속 시킬 수 있으며 다양한 비전 관련 기능을 활용할 수 있다. 특히, 깊이 정보를 기반으로 물체까지 3차원 좌표를 구할 수 있고 3D 스캐닝 및 모델링 기법을 통해 물체 부피 및 표면적을 계산할 수 있다. 이러한 장점들은 본 설계에 필요한 기능과 부합하기 때문에 Depth camera 종류는 Intel Realsense Camera로 선택했다.

본 설계에 적용되는 Depth camera는 로봇팔이 수거할 수 있는 범위 내에서 깊이를 측정할 수 있어야 한다. 또한, 로봇팔은 로봇청소기 전방 250mm 내에 있는 물체를 수거하도록 설계되었다. 따라서, 본 설계에서는 Intel Realsense Camera 중 깊이 측정 범위가 70~500mm인 D405 모델을 선정했다.

Fig. 39 Comparison of Intel RealSense Camera models[24]

5.3.2 물체 식별 알고리즘

Depth camera를 통해 실시간 이미지를 얻었다면, 해당 이미지에서 특정 물체를 배경으로부터 분류해야 한다. 일반적으로 이미지나 동영상을 다루는 Computer vision 작업에서는 객체 인식 알고리즘이 해당 기능을 수행한다. 본 설계의 수거 동작 메커니즘에는 높은 분류 정확도와 많은 물체 종류를 학습한 딥러

닝 객체 인식 알고리즘인 YOLO(You Only Look Once) 알고리즘을 사용했다. YOLO 알고리즘은 실시간 객체 인식 시스템으로, 학습된 모델을 기반으로 물체의 종류를 구별할 수 있으며 물체 영역을 사각형 Bounding box로 가둬서 배경으로부터 구분할 수 있다. 학습된 모델 종류 중 일반적으로 크기가 큰 종류는 수거 대상에서 제외할 수 있다. 예를 들어, 소파나 의자와 같은 물체를 수거 대상이 아닌 물체로 지정할 수 있다.

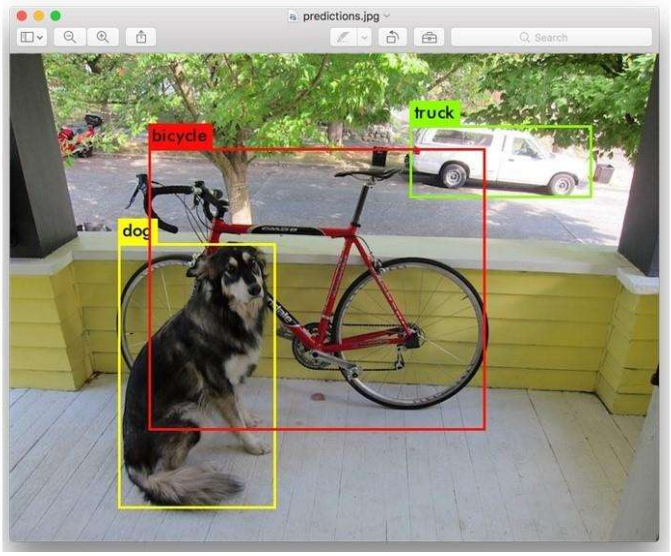


Fig. 40 Object-distinguished image by YOLO algorithm[25]

5.3.3 YOLO 객체 정보(darknet_ros)

ROS related parameters

You can change the names and other parameters of the publishers, subscribers and actions inside `darknet_ros/config/ros.yaml`.

Subscribed Topics

- **`/camera_reading`** ([sensor_msgs/Image])

  The camera measurements.

Published Topics

- **`object_detector`** ([std_msgs::Int8])

  Publishes the number of detected objects.

- **`bounding_boxes`** ([darknet_ros_msgs::BoundingBoxes])

  Publishes an array of bounding boxes that gives information of the position and size of the bounding box in pixel coordinates.

Fig. 41 ROS related parameters in darknet_ros package[25]

ROS에서 YOLO 알고리즘을 통해 얻은 데이터를 통신하기 위해서는 darknet_ros 패키지가 필요하다. darknet_ros 패키지는 Depth camera에서 전송된 실시간 이미지를 수신(Subscribe)하면 식별된 물체 수 정보를 담고 있는 object_detector 토픽과 물체 픽셀 좌표와 분류 라벨 정보를 담고 있는 bounding_boxes 토픽

을 발행(Publish)한다. 물체 픽셀 좌표는 물체를 감싸는 사각형 중심 좌표이며, 이 좌표를 Intel Realsense SDK 내장된 변환함수를 통해 Depth Camera에 두 렌즈의 양안 시차를 이용하여 실제 3차원 공간 좌표를 구할 수 있다.

Fig. 42 ROS related parameters in darknet_ros package

5.3.4 물체 부피 측정

Depth camera에 인식된 물체는 그리퍼가 파지할 수 있는 규격을 만족할 때 수거 대상 물체로 분류된다. 물체 규격을 구하는 방법으로 Intel Realsense Library에 box_dimensioner_multicam을 활용했다. box_dimensioner_multicam는 3D Scanning 기능을 통해 카메라상에 식별된 물체 표면에 깊이 정보를 종합하여 물체 영역을 육면체로 구분할 수 있다. 이때, Fig. 43과 같이 육면체의 가로, 세로, 높이의 실제 수치를 구할 수 있다.

Fig. 43 ROS related parameters in darknet_ros package

로봇팔에 장착된 그리퍼는 물체 위로 이동한 다음에 물체를 잡기 때문에 위에서 본 물체의 면적(Upper Area= Width×Length)이 판단 기준이 된다. 따라서, 확실한 파지 가능성을 높이기 위해 그리퍼 파지 가능 면적(11,953mm^2)보다 육면체의 윗면적이 작으면 수거 대상 물체로 구분했다. 또한, 물체를 수거함으로 옮기는 과정에서 차체 상판에 배치된 장치들과 충돌을 방지하기 위해 물체 최대 높이는 70mm로 제한했다.

5.3.5 로봇팔 역 기구학

앞서 구한 3차원 좌표로 End effector를 이동시키려면 로봇팔에 각 관절 변수를 계산해야 한다. 카메라와 로봇팔 각 관절에 좌표계를 부착하고 각 좌표계에 대한 D-H 파라미터를 구할 수 있다. D-H 파라미

터를 통해 카메라 좌표계(Base Frame)부터 End effector가 Pivot 지지 된 좌표계(Pivot Frame)까지 균질변환행렬(Homogeneous matrix)을 구할 수 있다. 이후 균질변환행렬에서 Base Frame에 대한 Pivot Frame의 위치벡터와 Base Frame에 대한 원하는 3차원 위치 좌표(x,y,z)를 일치시킴으로써 각 관절 변수에 대한 식을 유도할 수 있다.

Table 13 D-H parameter of robot arm and coordinate transformation

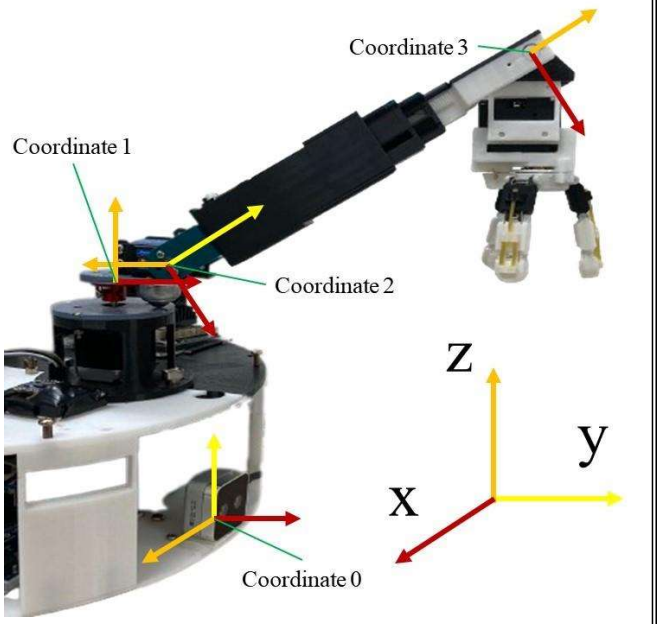


Fig. 44 D-H parameter of robot arm

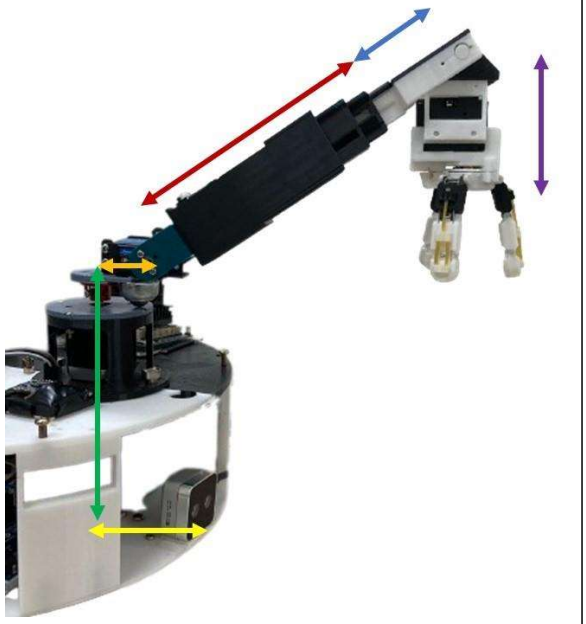


Fig. 45 Length of each part of robot arm

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	-90°	$-L_1$	θ_1	L_2
2	90°	L_3	θ_2 - 90°	0
3	-90°	0	0	$L_4 + d_3$

L_1	100mm	Yellow
L_2	180mm	Green
L_3	50mm	Orange
L_4	210mm	Red
d_3	x	Blue
H	110mm	Violet

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & -L_1 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_4+d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ \blacktriangleright \quad {}^{0}_{3}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1\sin\theta_2 & -\sin\theta_1 & \cos\theta_1\cos\theta_2 & \cos\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3)-L_1 \\ -\cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 & \sin\theta_2(L_4+d_3)+L_2 \\ -\sin\theta_1\sin\theta_2 & -\cos\theta_1 & -\sin\theta_1\cos\theta_2 & -\sin\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$\blacktriangleright \quad \therefore {}^{0}_{3}P = \begin{bmatrix} \cos\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3)-L_1 \\ \sin\theta_2(L_4+d_3)+L_2 \\ -\sin\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3 \end{bmatrix} \quad \therefore \begin{cases} x = \cos\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3)-L_1 \\ y = \sin\theta_2(L_4+d_3)+L_2 \\ z = -\sin\theta_1(\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3 \end{cases}$$

$$\blacktriangleright \quad \therefore \begin{cases} \sin\theta_1 = \dfrac{-z}{\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3} \\ \sin\theta_2 = \dfrac{y-L_2}{p} = \dfrac{y-L_2}{L_4+d_3} \end{cases} \text{ and } \begin{cases} \cos\theta_1 = \dfrac{x+L_1}{\cos\theta_2(L_4+d_3)+L_3} \\ \cos\theta_2 = \dfrac{\sqrt{(x+L_1^2)+z^2}-L_3}{p} = \dfrac{\sqrt{(x+L_1^2)+z^2}-L_3}{L_4+d_3} \end{cases}$$

$$\blacktriangleright \quad \therefore \begin{cases} \theta_1 = \arctan(\sin\theta_1, \cos\theta_1) \\ \theta_2 = \arctan(\sin\theta_2, \cos\theta_2) \\ d_3 = \sqrt{(\sqrt{(x+L_1)^2+z^2}-L_3)^2+(y-L_2)^2}-L_4 \end{cases}$$

End effector가 로봇팔에 장착된 방식인 수평 유지 장치는 항상 지면과 수평을 유지하기 때문에 D-H 파라미터를 구할 수 없다. 따라서, 물체가 그리퍼 파지 영역 안에 들어올 수 있도록 Pivot Frame의 위치는 실제 물체 위치보다 그리퍼 높이(H)만큼 더 위로 이동해야 한다. 관절 변수는 그리퍼 높이가 반영된 좌표를 기준으로 계산된다.

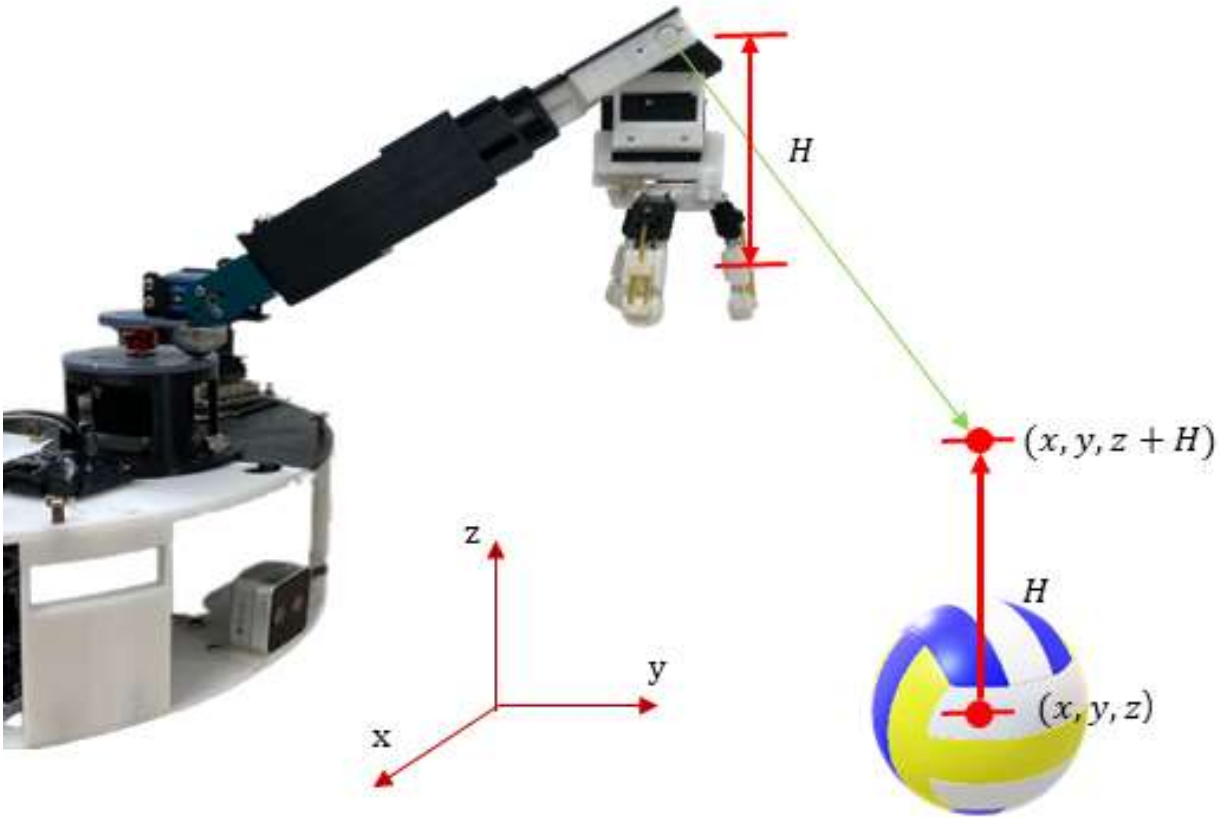


Fig. 46 Calculation coordinates reflecting gripper height

5.4 자율주행

로봇청소기는 경로를 따라 자율적으로 이동하며 바닥에 먼지를 흡입한다. 이 설계 제품도 마찬가지로 주어진 경로를 따라 자율적으로 이동할 수 있어야 한다. 또한, 주행 중 수거 대상 물체를 식별하면 수거할 때까지 정지해야 한다. 이를 수행하기 위해 ROS Package인 Move_base를 통해 자율주행을 구현했다.

5.4.1 Lidar 측정 범위 조절

Lidar는 로봇청소기가 운용되는 환경에 지도를 만드는 역할 뿐만 아니라, 주행하는 동안 주변 지형지물을 감지하면서 장애물을 식별하는 역할을 한다. 하지만, 차체 내부에 전선 같은 장치가 Lidar의 Laser 경로에 잡힌다면 장애물로 인식해서 자율주행 중에 문제가 생긴다. 이러한 문제가 생기지 않도록 Lidar의 최소 측정 범위를 로봇청소기 반경인 175mm 이상으로 설정해서 차체 내부 장치들을 장애물로 인식하지 않게 했다.

5.4.2 Map

Fig. 47의 왼쪽 사진은 2D RP Lidar와 Hector SLAM 알고리즘으로 생성한 실험 환경의 2D map이다. 오른쪽 사진은 지도상에서 지형지물 주변 일정 범위 영역을 모두 장애물로 인식하는 Global map을 보여준다. 로봇청소기 반경이 175mm이기 때문에 Inflation 설정으로 지형지물 주변 반경 300mm를 장애물로 인식하게 했다. 장애물로 인식된 영역은 검은색 음영으로 표시된다. Global 경로는 이 장애물로 인식된 영역과 부딪치지 않고 초기 위치부터 목표 지점까지 이동할 수 있는 경로를 생성한다. 로봇청소기 기준으로 생성된 하얀색 사각형 모양 지도는 Local map이다. 로봇청소기 중심으로 한 변의 길이가 3m인 정사각형 영역에 주변 장애물을 실시간으로 업데이트한다.

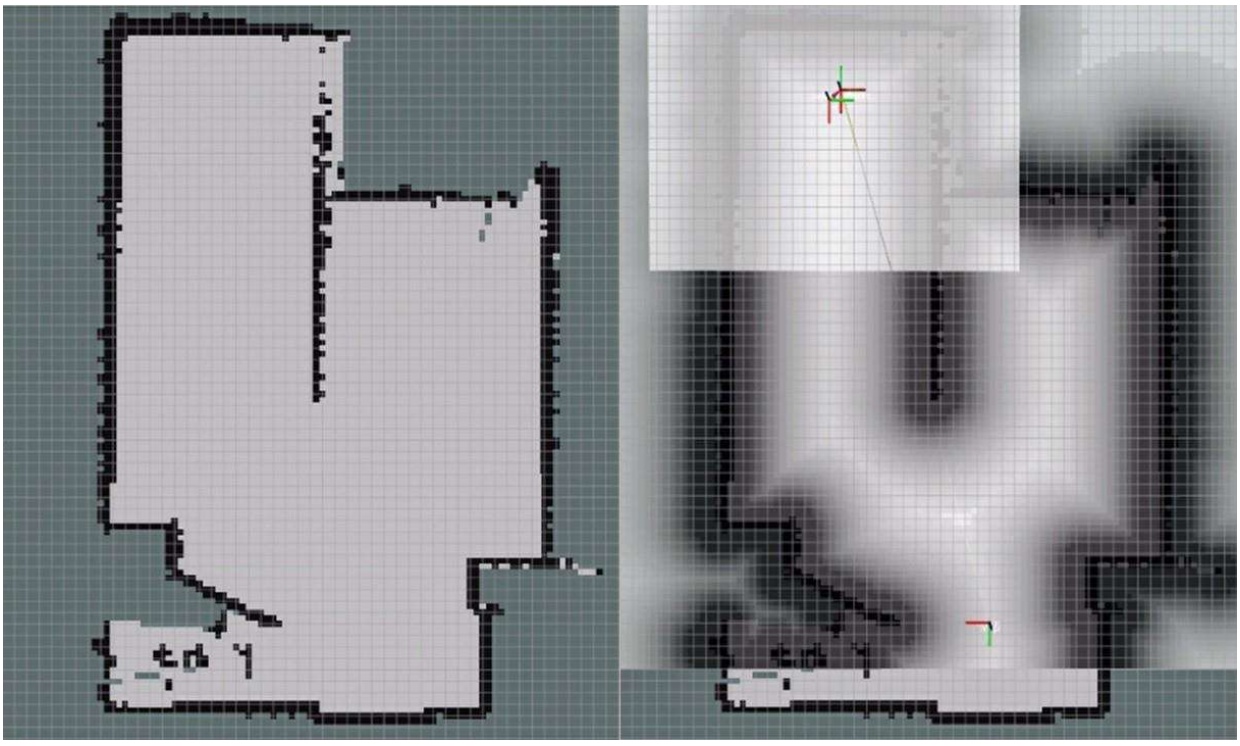


Fig. 47 (a) 2D map, and (b) Local and Global Map

5.4.3 Initial position & Final position

Fig. 48은 지도상에서 로봇에 초기 위치 및 방위(초록색 화살표)와 목표 위치 및 방위(보라색 화살표)를 지정한 모습이다. 이 두 가지 위치 정보를 지정하면 장애물과 부딪히지 않고 목적지까지 갈 수 있는

Global 경로가 생성된다. 로봇이 이동하는 동안 경로를 막는 장애물이 식별되면 우회하는 Local 경로를 생성해서 장애물을 피하고 다시 Global 경로를 따라 이동하게 된다. 이 기능을 통해 수거할 수 없는 물체가 갑자기 나타난다면 우회하는 Local 경로를 따라 피할 것이고, 수거할 수 있는 물체라면 로봇청소기를 멈추고 로봇팔이 물체를 수거할 것이다.

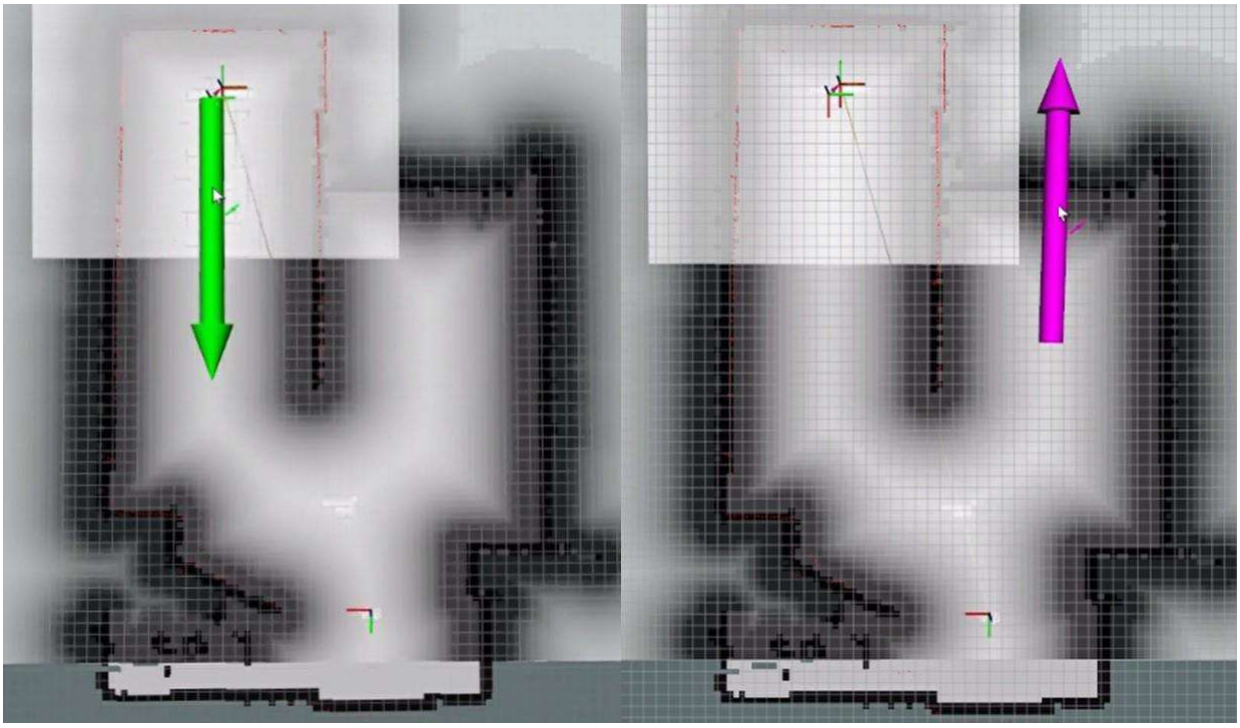


Fig. 48 Set initial position and final position

5.4.4 자율주행 이동

Fig. 49는 Fig. 48에서 설정한 초기 위치에서 최종 위치로 자율주행으로 이동하는 과정을 보여준다. 라이다에서 발산된 레이저가 빨간색 점으로 주변 지형지물을 나타내는 것을 나타내며 로봇은 초록색 Global Path를 따라 이동한다.

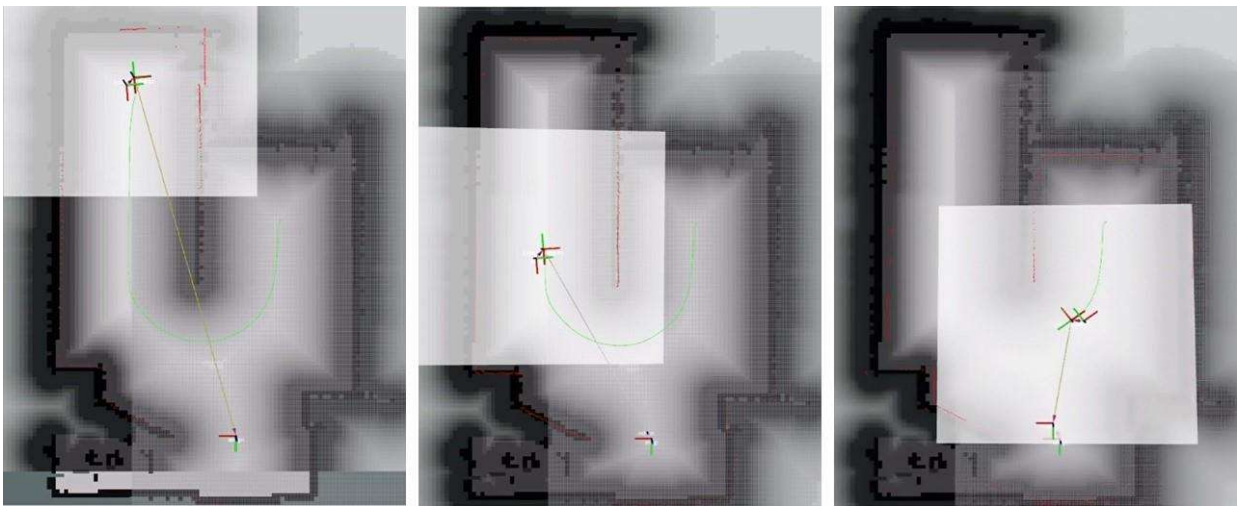


Fig. 49 Autonomous driving process

5.4.5 로봇 속도 제어 방법

Move_base 패키지는 로봇이 경로를 따라 이동할 수 있도록 적합한 속도를 전달한다. 전달되는 속도는 직선 속도(v)와 각속도(w)이며 이 두 가지 속도와 로봇 규격 정보를 기반으로 Fig. 50과 같이 좌우 바퀴의 회전 속도가 결정된다. 이 속도는 ROS 통신을 통해 아두이노에 전달되며 PID 제어를 통해 모터에 PWM을 조절함으로써 로봇이 해당 속도로 움직이게 한다.

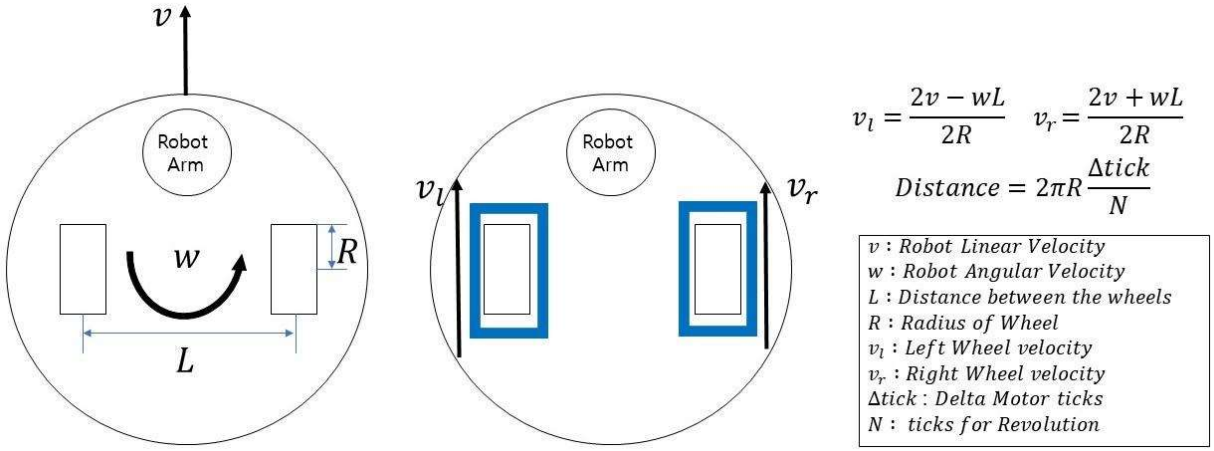


Fig. 50 Relationship between body movement and wheel speed

5.4.6 PID 제어

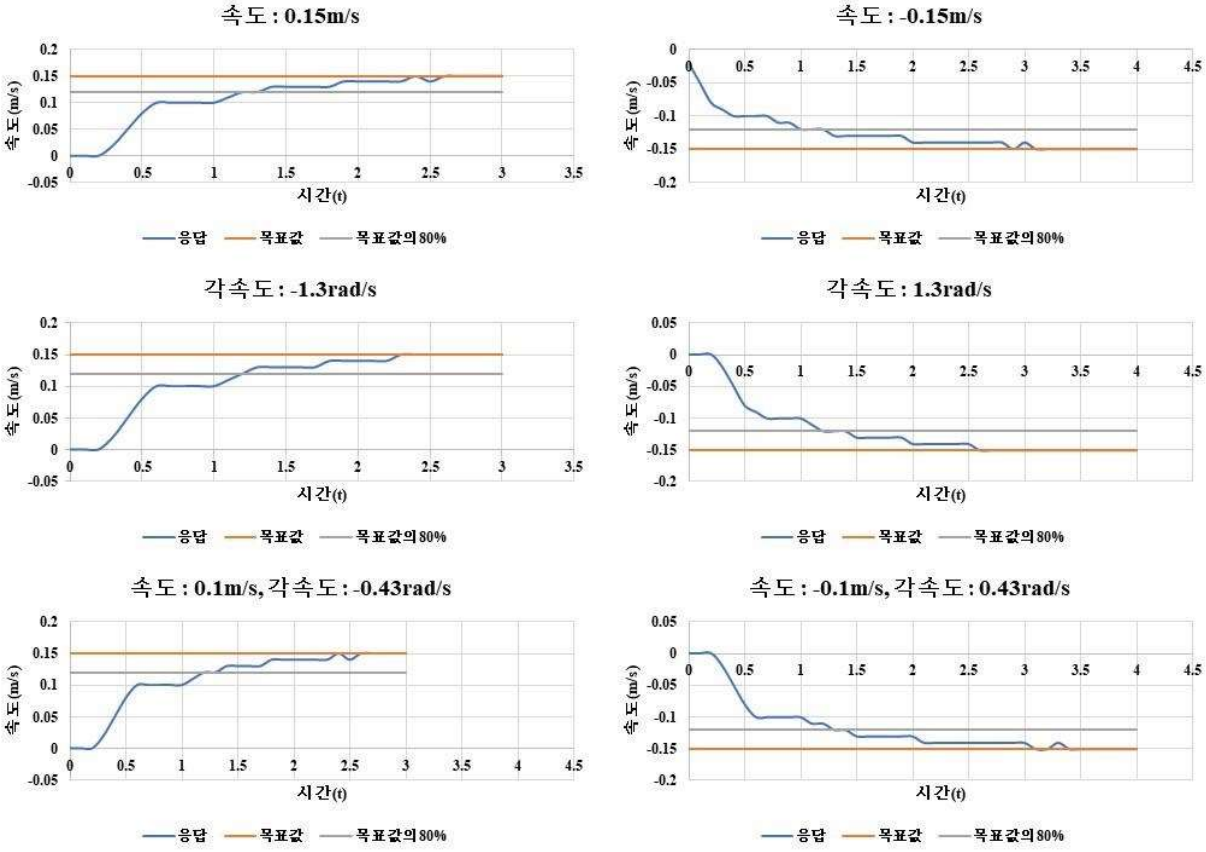


Fig. 51 Velocity response graph

Table 14 PID gain

	Left motor	Right motor
Proportional gain	3.51	3.45
Integral gain	0.178	0.156
Derivativational gain	1.9	1.85

로봇 속도를 수신할 때 그 속도로 모터를 제어하기 위해 PID 제어를 활용했다. PID 파라미터 튜닝을 통해 목표 속도까지 걸리는 시간을 감소시켜서 속도 변화에 따라 신속하게 반응할 수 있게 하고 목표 속도에 정확하게 수렴하도록 했다.

차체의 움직임에 대하여 PID 제어를 통해 나온 응답 속도와 목표 속도를 나타낸 그래프는 Fig. 51과 같다. Fig. 51의 그래프들은 각각 로봇청소기의 선 속도가 ±0.15m/s일 경우, 각속도가 ±1.3rad/s(=±0.15m/s)일 경우, 선 속도가 ±0.1m/s이고 동시에 각속도가 ±0.43rad/s로서 전체 속도가 ±0.15m/s일 경우로 총 6가지에 대해 나타내고 있다. 위 그래프의 6가지 경우에 대해 응답 속도가 목표 속도인 ±0.15m/s과 같아지는 평균적인 시간을 확인하면 2.6초인 것을 확인할 수 있다. 또한 응답 속도가 목표 속도의 80%에 가까워지는 시간은 평균 1.2초인 것을 확인할 수 있다. 이러한 PID 제어는 자율주행 시 신속한 방향 전환, 또는 정확한 속도 변환의 결과로 이어져 보다 원활하고 정교한 자율주행이 이루어지도록 돕는다.

5.4.7 ROS 자율주행 통신 관계

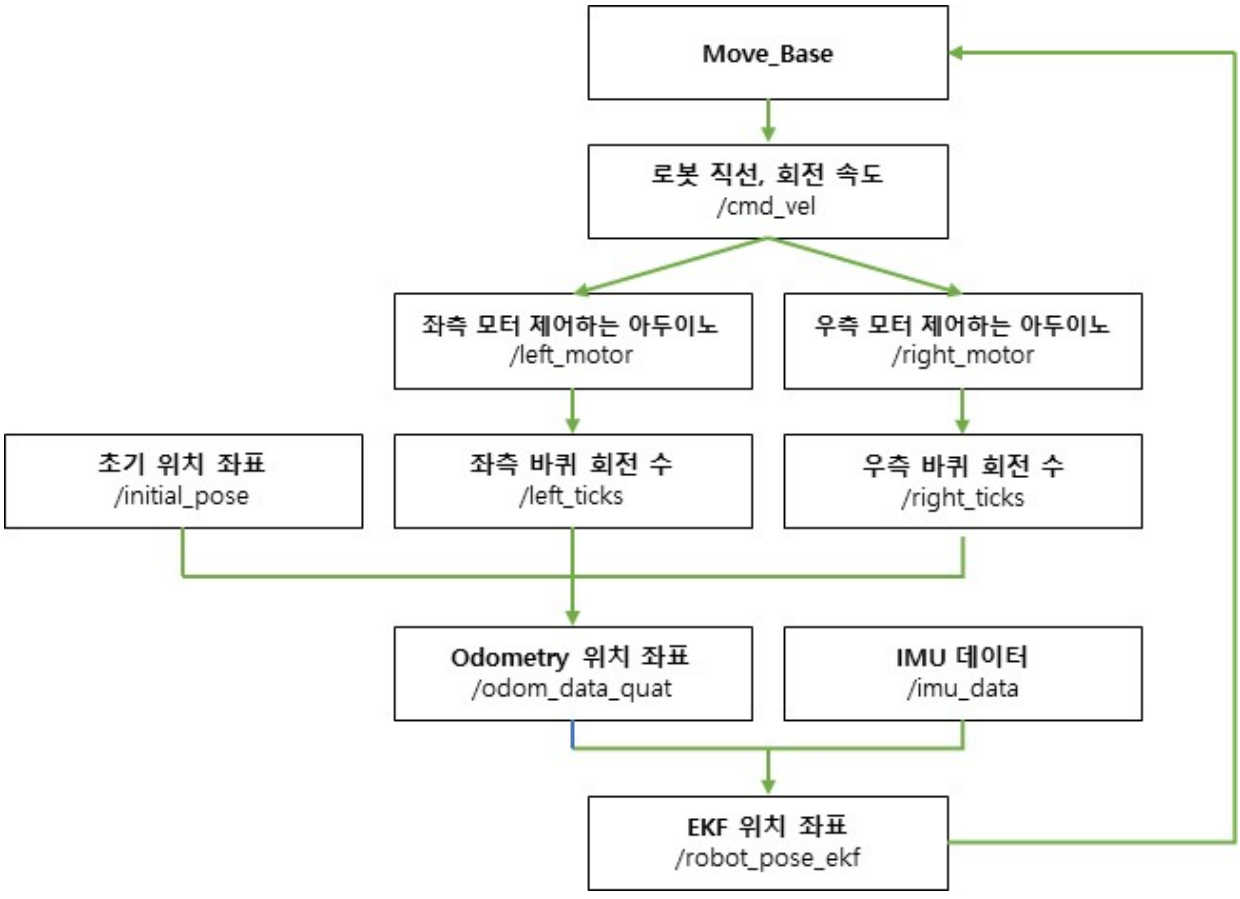


Fig. 52 Autonomous driving data transfer relationship

Move_Base 패키지는 로봇이 경로를 따라 이동하도록 하는 로봇의 속도를 아두이노(/left_motor, /right_motor)에 전달한다. 좌우 모터의 회전수(/right_ticks, /left_ticks)는 인코더 센서로 읽어지며 로봇청소기의 초기 위치(/initial_pose)로부터 누적된 이동 거리를 통해 로봇의 위치(/odom_data_quat)를 추정할 수 있다. 그러나, 바퀴가 회전하면서 미끄러지거나 헛도는 현상으로 오차가 생길 수 있다. 이러한 문제를 예방하기 위해 IMU 방위 데이터(/imu/data)를 조합하여 최적화된 위치 좌표(/robot_pose_ekf)를 구한다. 이 최적화된 위치는 Move_base로 전달되어 새로운 위치에서 경로를 따라 이동하기 위한 새로운 속도를 로봇에게 전달하게 된다. 이러한 과정은 로봇이 목표 지점에 도착할 때까지 반복된다.

5.5 전체 구조도

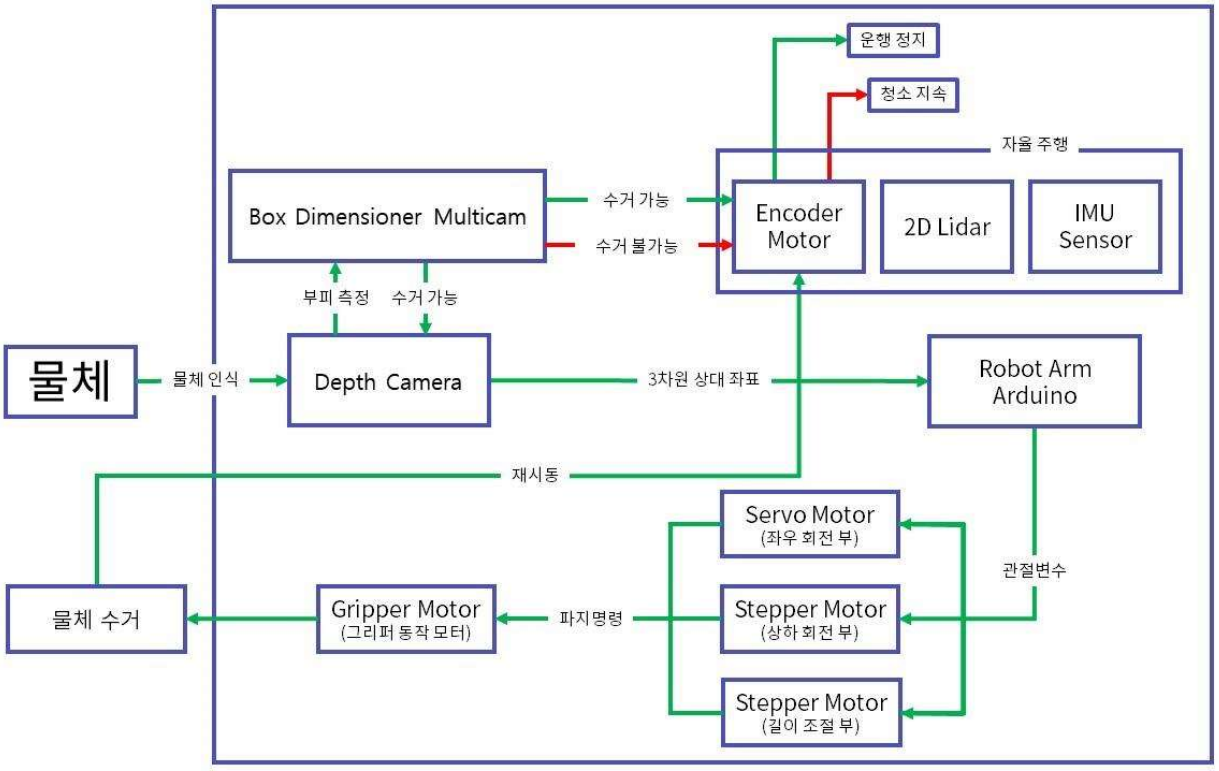


Fig. 53 Overall system configuration diagram

앞서 설명한 물체 인식 장치와 자율주행, 로봇팔 시스템을 모두 합치면 Fig. 53과 같은 구조를 갖는 시스템이 완성된다.

① 지도상에 초기 위치와 도착 위치가 결정되면 생성된 경로를 따라 자율주행을 한다.

② 자율주행 중에 물체가 YOLO 객체 인식으로 식별되면 객체 중심 좌표에 깊이 값을 계산해서 로봇팔 도달 범위 안에 있는지 평가한다.

③ 도달 범위 안에 물체가 식별되면 box_dimensioner_multicam을 통해 물체 규격을 기반으로 수거 대상인지 평가한다.

④ 물체가 수거 대상이라면 차체 바퀴를 구동하는 인코더 모터에 정지 신호를 보내서 멈추게 한다.

⑤ 깊이 카메라는 YOLO 객체 중심 좌표에 대한 3차원 좌표를 구하고 로봇팔을 제어하는 아두이노에 전달한다.

⑥ 3차원 좌표를 기반으로 로봇팔에 각 관절 변수를 계산하고 움직여서 물체를 수거함으로 옮긴다.

⑦ 수거가 끝나면 완료 신호를 인코더 모터와 깊이 카메라에 전달해서 자율주행을 시작하고 새로운 물체 정보를 받아올 준비를 한다.

⑧ 수거할 수 없는 크기의 물체라면 멈추지 않고 우회하는 Local 경로를 따라 물체를 피해 간다.

5.6 회로 연결

5.6.1 전체 회로도

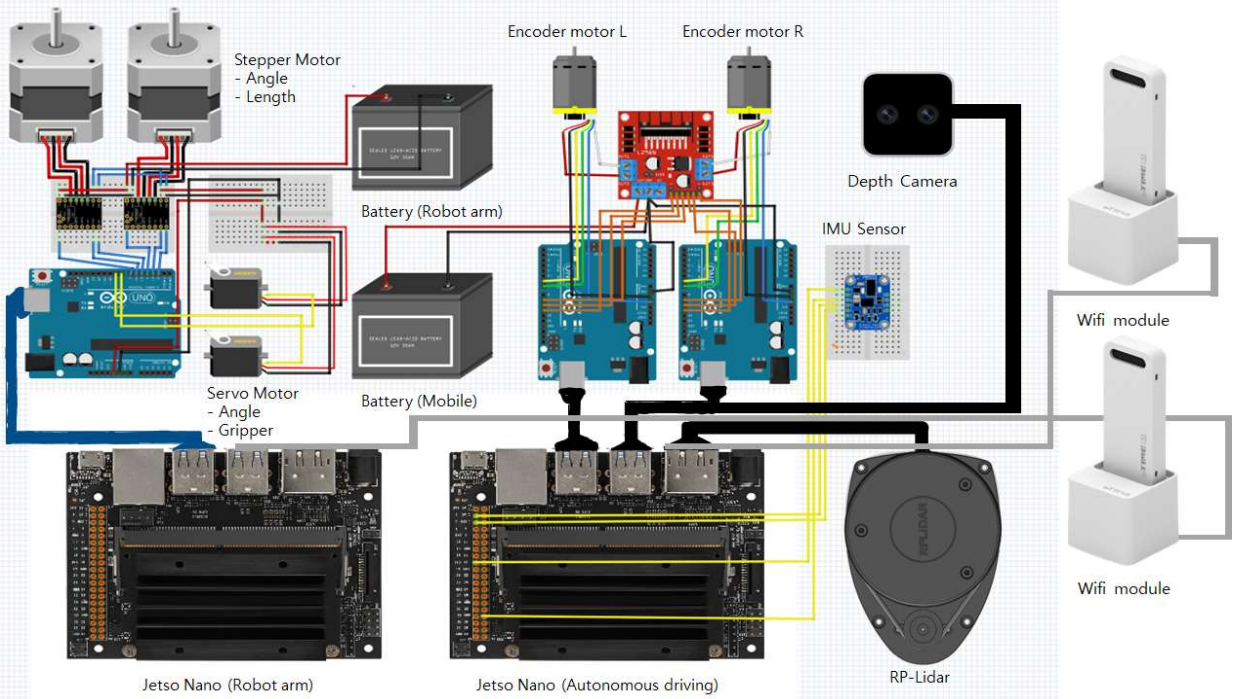


Fig. 54 Circuit diagram of whole mechanism

전체 회로의 구성요소는 동작을 위한 액추에이터인 모터들과 각각의 로봇팔과 자율주행 모터의 전력을 위한 2개의 배터리가 있으며 각 모터에 걸릴 부하를 최소화하기 및 제어하기 위한 모터 드라이버들, 그리고 이를 제어할 아두이노 보드가 로봇청소기의 각 동작을 수행하게 된다. 또한 자율주행을 위한 Lidar, 물체 인식을 위한 Depth Camera, 방향 감지를 위해 IMU 센서가 들어간다.

전체 회로의 특징 중 하나는 로봇청소기의 신속하고 정확한 이동을 위하여 좌우 모터에 각각 아두이노 보드를 사용하여 회로를 구성하였다는 것이다. 좌우 모터에는 높은 주기로 속도가 전달되기 때문에 하나의 아두이노 보드로 두 개 모터를 제어하면 연산량이 누적되는 문제가 생긴다. 이를 해결하고자 위에서와 같이 아두이노를 각각 사용하여 연산량을 줄이는 방법으로 해결하였다.

전체 회로의 다른 특징으로는 로봇청소기의 자율주행과 물체 수거의 원활한 동작 및 명령처리를 위해 자율주행을 위한 회로와 물체 수거를 위한 회로로 나누어져 구성하였고, 이들 간의 통신을 위한 Wi-Fi 모듈로 추가하였다는 것이다. 이를 위해 센서들의 데이터 처리와 모터 구동을 위한 중앙 컴퓨터를 추가하였다.

5.6.2 중앙 컴퓨터

위와 같은 시스템을 구축하기 위한 중앙 컴퓨터로 Jetson Nano를 사용했다. Jetson Nano는 GPU로 병렬연산할 수 있어서 연산량이 크게 요구되는 비전 처리와 자율주행을 운용하기에 적합하다. Jetson Nano는 USB 포트 개수가 4개로 제한되기 때문에 2개 Jetson Nano로 Depth Camera와 로봇팔, 자율주행을 하는 것으로 역할을 나누었다. 과도한 연산에 따른 소모 전력이 크기 때문에 T208 전원 관리 보드로 전력을

공급했다. Wi-Fi Dongle을 통해 같은 Wi-Fi 연결망에 연결하고 ~/.bashrc에 ROS_IP, ROS_MASTER_URI 설정을 통해 두 Jetson Nano 사이에서 데이터를 통신할 수 있게 했다.

Table 15 Setting environment variables for TCP communication

	IP	**~/.bashrc**
Jetson Nano for vision and robot arm	172.20.10.2	export ROS_MASTER_URI=http://172.20.10.2:11311 export ROS_IP=172.20.10.2
Jetson Nano for autonomous driving	172.20.10.4	export ROS_MASTER_URI=http://172.20.10.2:11311 export ROS_IP=172.20.10.4

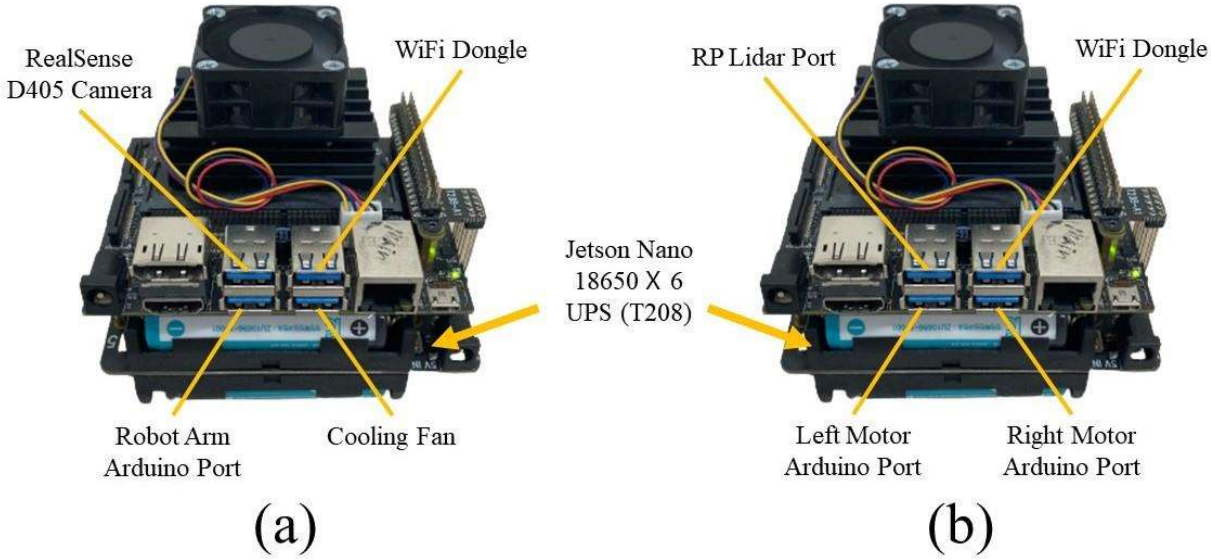


Fig. 55 Port connection of (a) Jetson Nano for autonomous driving and (b) Jetson Nano for vision and robot arm

6. 전체 설계

6.1 전체 설계 제품 Test

6.1.1 Test 준비

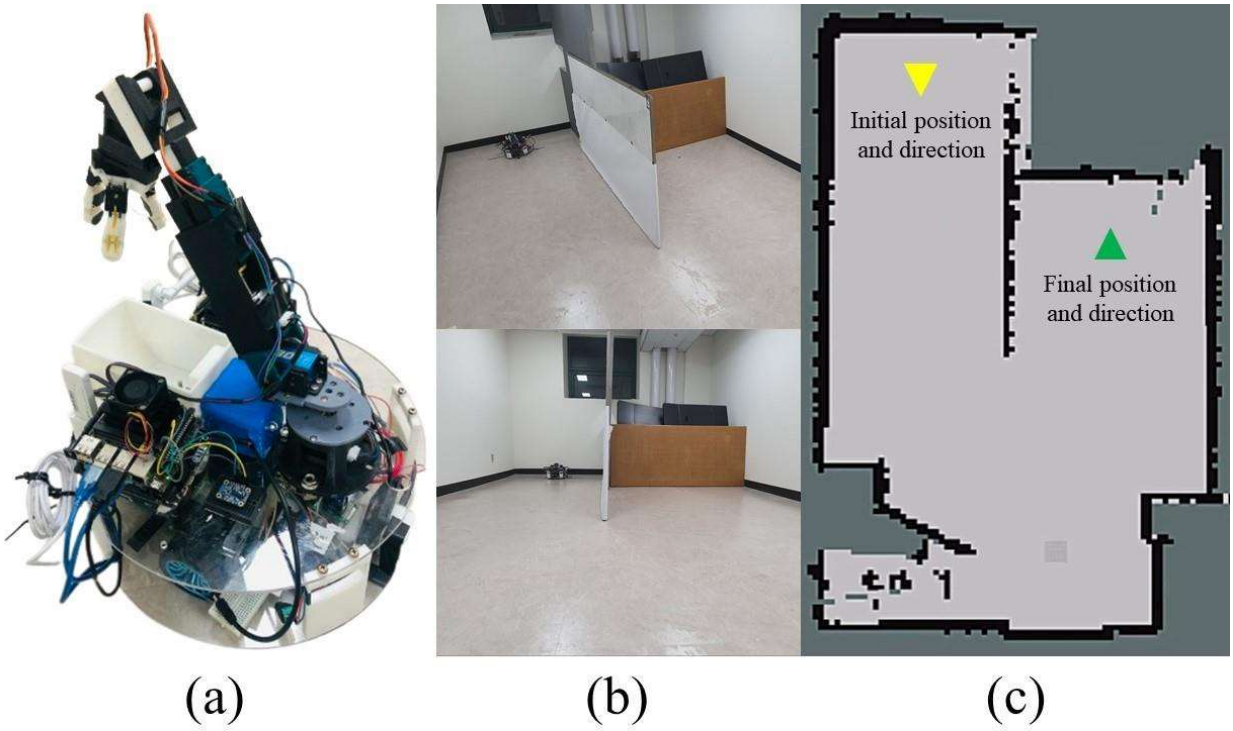


Fig. 56 (a) Whole body, (b) Inside of room, and (c) Mapping of room

Fig. 56 (a)는 앞서 언급한 내용을 기반으로 제작된 최종 설계 제품이다. 차체, 로봇팔, End effector를 결합하여 제작된 하드웨어에 동작 및 제어 메커니즘을 수행하는 데 필요한 Arduino와 Jetson Nano 같은 부품들이 장착되어 있다. 하지만, 본 설계의 완성 여부를 결정하기 위해서는 Fig. 56 (a)의 설계 제품이 수거 대상 물체를 제대로 인식하고 파지하는지 확인해야 한다.

본 설계 제품은 로봇청소기의 물체 수거를 목적으로 만들어졌다. 따라서, 본 설계의 테스트 역시 완성된 설계 제품이 자율주행하면서 물체를 원활하게 수거하는지 확인해야 한다. 이를 확인하기 위해서는 테스트를 진행할 실험 환경이 필요하기에 Fig. 56 (b)와 같은 내부 구조를 가진 실험 환경을 구축하였다. 또한, 본 실험은 로봇청소기가 청소하는 중이라는 배경을 전제로 설계되었기 때문에 실험 환경을 자율주행할 수 있어야 한다. 따라서, 설계 제품 내 Lidar를 작동시켜 Fig. 56 (c)와 같이 map을 생성하였다.

6.1.2 Test 결과

설계 제품은 Fig. 56 (c)에 표시된 초기 위치에서 목표 위치까지 지형지물과 부딪치지 않는 경로를 따라서 이동한다. 경로를 따라 이동하던 중 수거 범위 안에 물체가 나타나면 3D Scanning 기능으로 물체의 규격 정보를 구해서 수거 가능 여부를 판단한다. Fig. 57을 보면 그리퍼의 파지 가능 면적(11,953mm^2)보다 식별된 물체의 윗면적(Length×Width=14,196mm^2)이 더 크기 때문에 수거할 수 없는 물체로 분류되어 수거하지 않고 우회하는 과정을 보여준다. 반면, Fig. 58과 같이 식별된 물체의 윗면적이 기준보다 작은 경우에 이동을 멈추고 물체까지 상대좌표를 계산하여 수거 동작을 수행하게 된다.

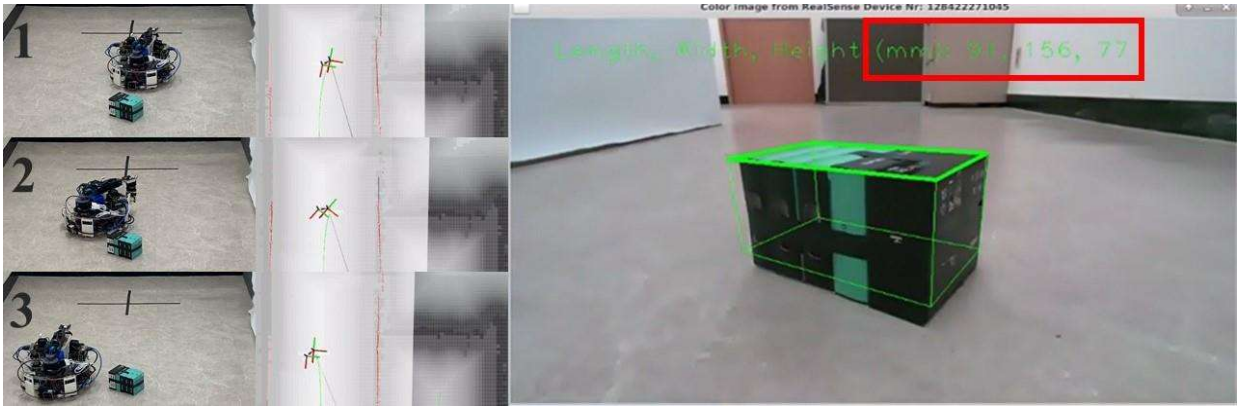


Fig. 57 Avoiding a large object during autonomous driving

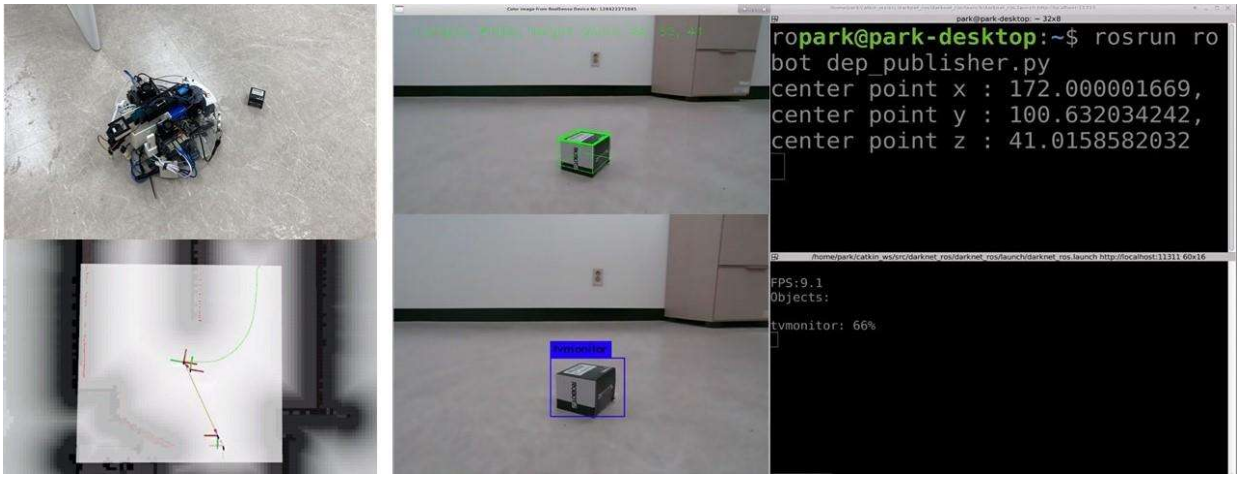


Fig. 58 Autonomous driving before detecting an object and results of checking the coordinates and volume of the object

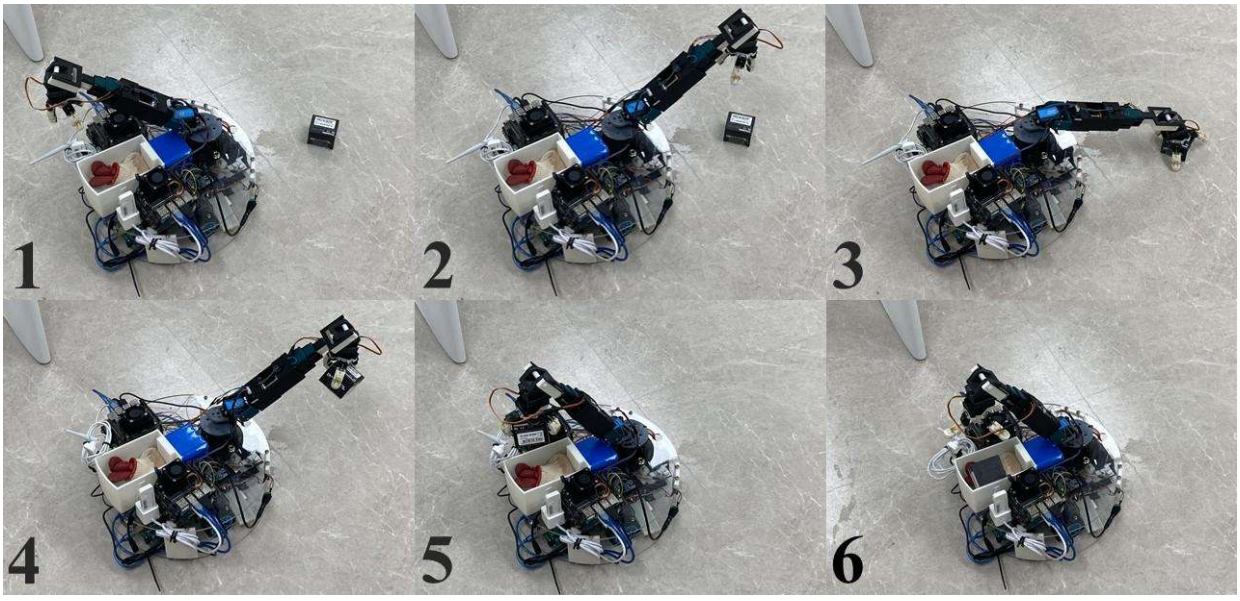


Fig. 59 Overall order of action

본 설계 제품이 물체를 수거할 때는 Fig. 59의 과정을 순서대로 진행한다. (1), (2)는 로봇청소기가 자율주행하다가 Depth camera가 수거 가능 범위 안에 수거 대상 물체임을 인식하고 로봇팔을 움직이는 모습이다. (3)에서 로봇팔이 물체를 파지한 후 (4), (5)에서 물체를 들고 회전하여 수거함까지 이동하는 모습을 보여주고, 마지막으로 (6)은 그리퍼가 손가락을 피면서 파지한 물체를 수거함에 보관하는 모습이다. (6)의 과정이 끝나면 다시 자율주행을 진행하고 다른 수거 대상 물체가 발견되면 다시 앞선 과정을 거치거나 수거 대상 물체가 없다면 설정한 목표 위치로 이동한다.

목표 위치에 도달하면 Fig. 60 (a)처럼 'Goal reached'라는 문구가 나오면서 자율주행이 종료된다. 이러한 과정을 통해 본 설계 제품이 초기 위치와 목표 위치를 지정하면 자율적으로 map과 경로를 생성하고 움직이는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 자율주행을 하는 도중에 수거해야 하는 물체를 인식하면 정지하고 로봇팔과 그리퍼가 작동하여 물체를 성공적으로 수거하는 것도 확인할 수 있었다.

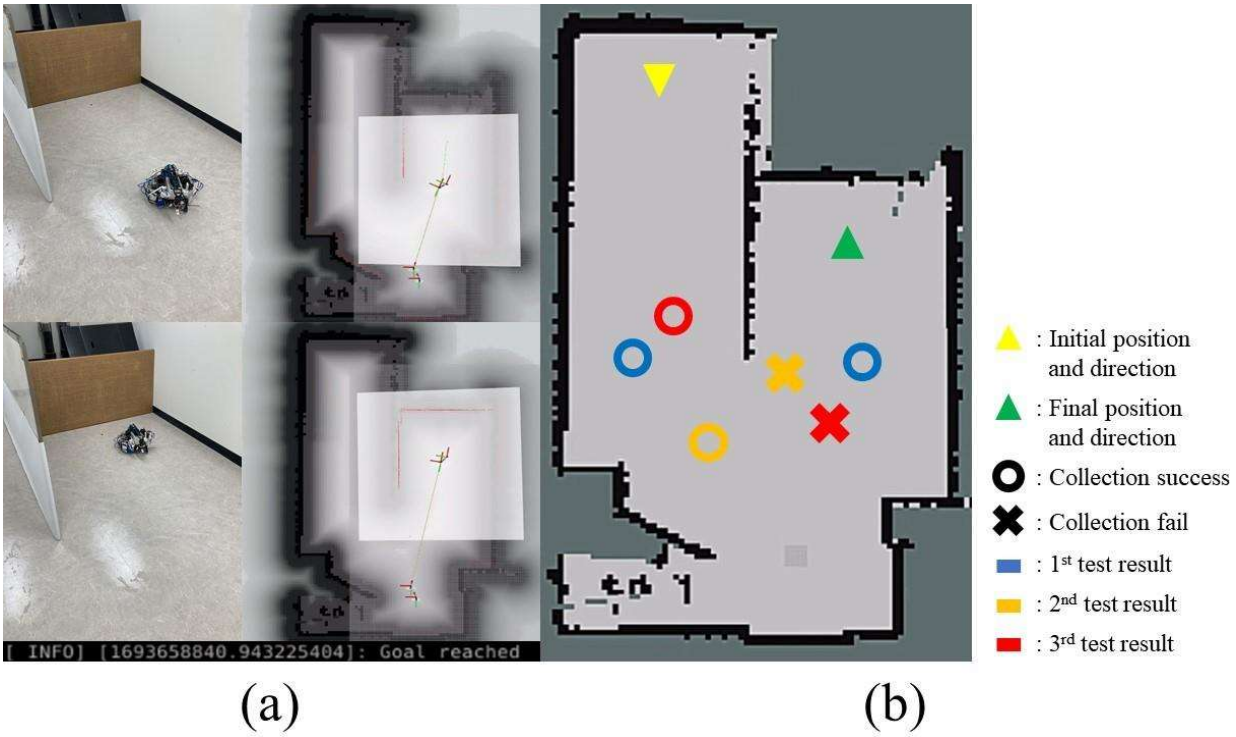


Fig. 60 (a) End of autonomous driving, and (b) results of whole tests

다만 Fig. 60 (b)를 보면 일부 실패한 때도 있었는데, 이는 구조적인 이유와 제어 알고리즘에서의 이유로 설명될 수 있다. 구조적 이유는 다시 두 가지 경우로 나뉘는데 하나는 그리퍼가 물체를 수거한 이후 로봇팔이 움직이는 과정에서 그리퍼가 흔들리며 물체가 떨어진 경우이다. 다른 하나는 그리퍼의 반복적인 파지 동작 수행으로 인해 내부 텐던이 풀리에 제대로 감기지 않은 경우였다. 이러한 경우는 로봇팔이 움직이는 속도를 줄이거나, 그리퍼를 움직이게 하는 모터의 회전수를 증가시키면 해결될 것이다.

제어 방식의 문제점은 수거를 위해 차체가 정지하는 동안 나타났다. 로봇이 자율주행을 하다가 수거 대상 물체를 식별했을 때, 차체에 정지 신호를 보내고 로봇팔에 물체까지 상대좌표를 전달한다. 이때, 로봇청소기가 주행하던 속도에서 0으로 감소하는 동안 조금씩 이동하면서 상대좌표에 차이가 생기게 된다. 이는 로봇팔이 정확한 물체 위치로 이동하지 못하게 되는 원인이 되었다. 이러한 상황을 해결하기 위해 차체가 완전히 정지한 것을 인식한 후에 새롭게 물체의 좌표를 로봇팔에 전달하는 방식으로 제어 방법을 수정할 수 있을 것이다.

6.2 특허 비교

본 논문의 그리퍼를 활용한 물체 수거가 가능한 로봇청소기 이외에도 물체를 수거할 수 있는 로봇청소기를 개발하기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. Fig. 61 (a)와 같이 차체의 전면부에 로봇팔을 부착하여 물체를 쓸어 담는 방식[26], Fig. 61 (b)와 같이 양쪽의 판이 모이면서 물체를 잡는 방식[27], Fig. 61 (c)와 같이 차체의 최상부에 로봇팔을 부착하여 물체를 수거하는 방식, Fig. 61 (d)와 같이 몸체 중앙에 팔을 수납하고 있다가 물건 회수 시 가운데에서 팔이 나와 물건을 회수하는 방식 등이 있다.

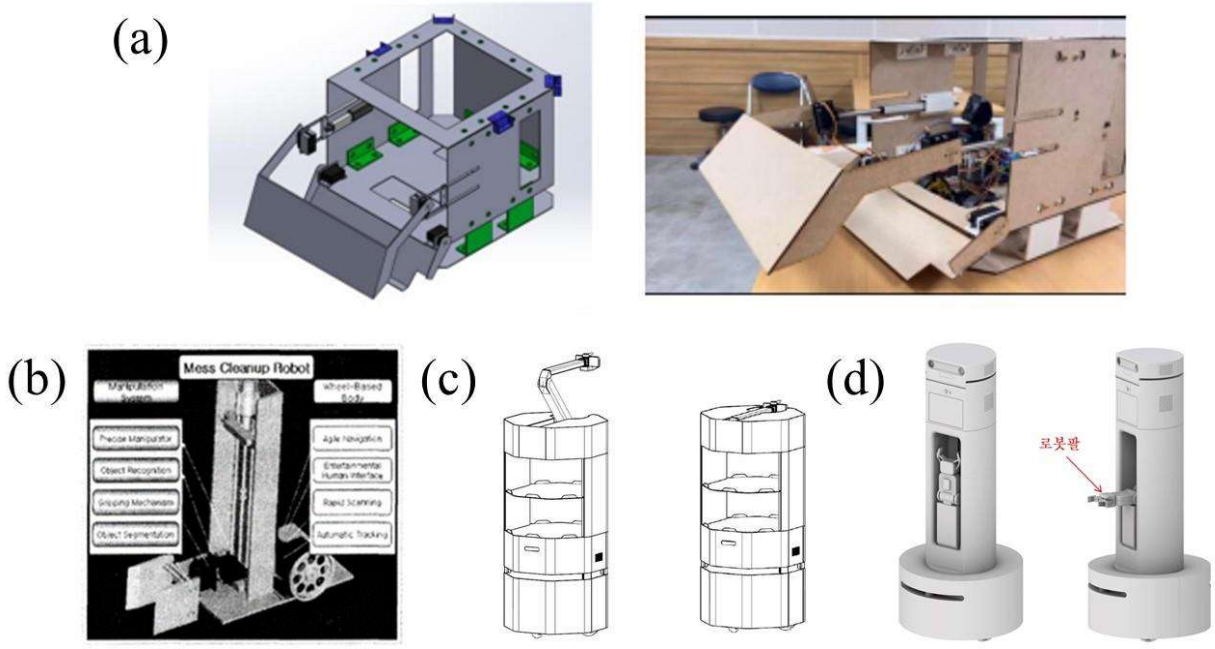


Fig. 61 (a) Self-driving trash can robot using Deep learning, (b) A study on implementation of home mess-cleanup robot, (c) Self-driving service robot using Deep learning, and (d) Self-driving home care service robot using Deep learning

Fig. 61 (a), (b)와 같은 방식은 수거하고자 하는 물체만을 정확히 잡지 못하고, 주위 물체들의 영향을 받아 수거하지 못할 가능성이 있다. 또한 물체를 수거한 후에는 로봇청소기 자체에 물체를 보관할 수 있는 장소가 없기에 프로그래밍으로 설정한 지정 위치에 물체를 놓은 후 청소하므로 효율성이 떨어진다는 단점이 존재한다. 하지만 본 논문의 물체 수거가 가능한 로봇청소기는 그리퍼를 사용하여 물체를 수거하기 때문에 인식한 물체만을 정확하게 수거하여 정리할 수 있다. 또한 물체를 수거한 후에 차체 위의 물체 수거함에 물체를 보관하고 그 자리에서 다시 작동을 이어가므로 청소 효율성이 증가하게 된다.

Fig. 61 (c), (d)와 같은 경우는 본 논문의 로봇청소기와 비교하여 건물 내에서 하는 자율주행이 가능하며 로봇팔을 사용한 물체 수거 기능이 있다는 공통점을 가지고 있다. 하지만 Fig. 61 (c), (d)는 일반 가정이 아닌 식당, 회사 등과 같은 장소에서 서비스를 제공하는 목적으로 활용되고 있기에 차체의 형상이 수직으로 기립한 형상으로 설계되어 있다. 따라서 바닥에서의 청소를 목적으로 하는 본 설계의 로봇청소기는 Fig. 61 (c), (d)와는 다른 형태와 목적성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

6.3 원가 계산

본 설계 제품의 원가를 계산하기 위해 '차체', '로봇팔', '그리퍼', '동작 및 제어 메커니즘'으로 나누어 계산했다. 각 부분의 주요 부품의 원가를 계산했으며, 볼트 & 너트 등 주요 요소가 아닌 것은 제외했다. 또한, 3D Printing이나 레이저 가공처럼 장비를 사용하는 경우 사용료와 재료의 가격을 원가로 계산했다.

Table 16 Product list

구분	사용 부분	제품명	수량	가격	구매 / 배송사
Body	인코더 모터 set (바퀴, 브래킷, 볼트 & 너트)	JGB37-520 인코더 모터	2EA	20,986	AliExpress
	볼 캐스터	볼 캐스터 5/8형	2EA	1,780	G마켓
	차체 상/하판	아크릴판	2EA	41,000	알파문구 (오프라인)
	추가가공비용	레이저 가공비	-	4,000	학교 내 외주
	3D Printing(HW)	ABS Filament	160g	16,000	
	소모비용			83,766	
Robot arm	**사용 부분**	**제품명**	**수량**	**가격**	**구매 / 배송사**
	샤프트	샤프트 2파이	120mm	1,173	디바이스 마트
	황동 기어	브라스 스퍼기어 2∅ 10T	4EA	3,960	
	스텝모터(각도)	NEMA17 스테퍼 모터	1EA	15,850	쿠팡
	스텝모터(길이)	NEMA 17 리드 스크류 스테퍼 모터	1EA	24,443	AliExpress
	서보 모터	LW-30MG	1EA	42,750	쿠팡
	플랜지	플랜지 커플링	1EA	14,030	11번가
	볼 캐스터	볼 캐스터 5/8형	1EA	890	G마켓
	3D Printing(HW)	ABS Filament	342g	34,200	학교 내 외주
	소모비용			137,296	
Gripper	**사용 부분**	**제품명**	**수량**	**가격**	**구매 / 배송사**
	샤프트(90mm)	샤프트 2파이	60mm	587	디바이스 마트
	황동기어	브라스 스퍼기어 2∅ 10T	3EA	2,970	
	서보 모터	Dynamixel XM430-W350-T	1EA	278,300	로보티즈 샵
	실리콘	실리콘패드 판 시트 B0020-B(2T)	(225*110)mm^2	5,200	네이버쇼핑
	강력접착제	록타이트 401	1EA	2,350	알파문구 (오프라인)
	3D Printing(HW)	ABS Filament	90g	9,000	학교 내 외주
	소모비용			298,407	
Mechanism	**사용 부분**	**제품명**	**수량**	**가격**	**구매 / 배송사**
	Jetson Nano	NVDIA Jetson Nano Development Kit	2EA	638,000	디바이스 마트
	Jetson Nano Power module	T208 UPS 모듈	2EA	170,000	
	Arduino Uno	Uno R3	2EA	19,800	
	Arduino MEGA	Mega 2560 R3	1EA	18,000	
	무선 랜카드	A3000U	2EA	55,200	쿠팡
	Cooling Fan	Ucommerce USB쿨링팬 DC5V 60MM	1EA	4,000	

	Depth camera	Intel RealSense D405	1EA	494,000	엠씨유보드닷컴
	서보 모터 드라이버	L298N	1EA	1,220	알파마이크로
	스텝모터 드라이버	TNC2225	2EA	38,560	11번가
	정전압 DC 컨버터	LM2596	1EA	1,040	에어써밋
	IMU Sensor	BNO055	1EA	86,890	나비엠알오
	Lidar	RP Lidar-A1	1EA	172,700	옥션
	충전지	Li-ion ICR18620	12EA	58,800	마켓프라이스
	베터리 팩	NW-12V pack	1EA	73,320	인터파크
		12V Mobile battery pack 4s3p	1EA	66500	서래상점1
	소모비용			1,898,030	
총 소모비용				2,417,499	

Table 16과 같이 본 설계 제품의 원가를 계산했을 때, 총 소모비용을 2,417,499원으로 책정할 수 있다. 기존 로봇청소기가 50~100만 원 사이로 형성되어 있는 것을 가정했을 때, 해당 가격은 경제적으로 저렴하다고 볼 수 없다. 다만 기존 로봇청소기의 차체를 사용한다고 가정했을 때, 물체 수거 모듈을 사용한다고 가정하면 약 1,200,000원을 사용하여 본 설계 제품을 제작할 수 있다. 또한, 기존 로봇청소기 중 물체 식별 기능을 가지고 있는 로봇청소기에 적용된다면 수거 기능을 추가하는 비용을 더 낮아질 것이다. 이처럼, 적용하려는 로봇청소기 모델에 따라서 예상 소모 비용이 크게 달라질 수 있기에 본 설계 제품이 경제성이 없다고 볼 수는 없다.

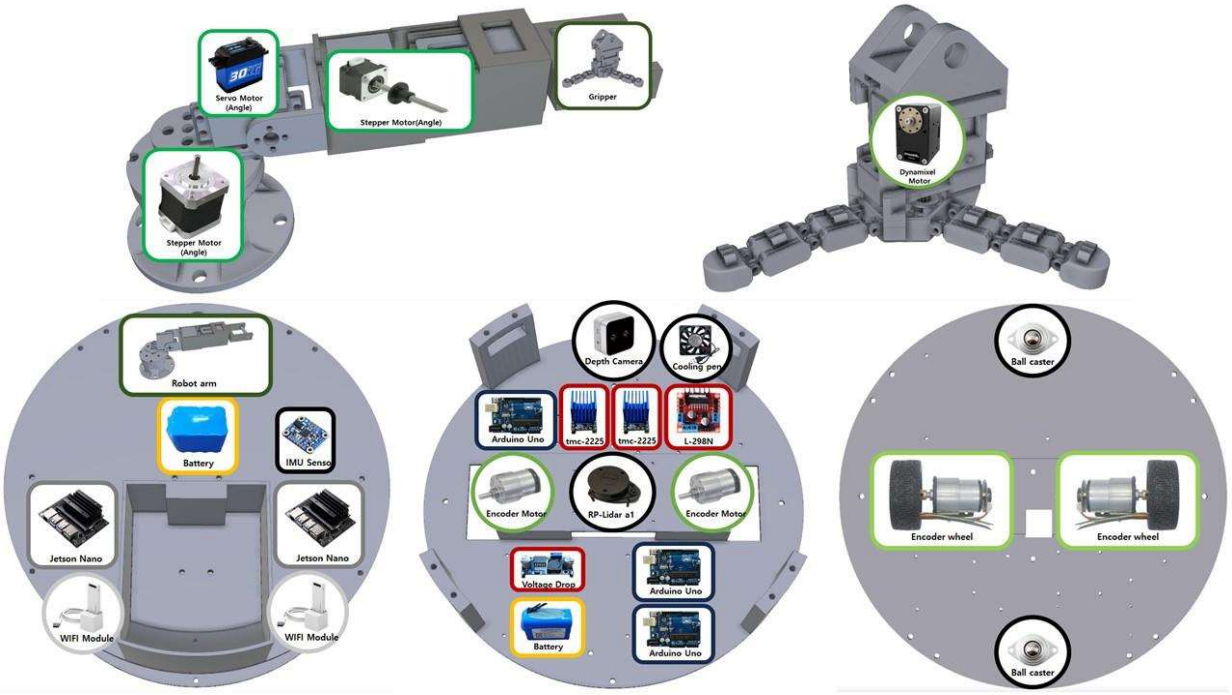


Fig. 62 Product location for each part

7. 결론

본 설계에서 제안한 장치는 기존 로봇청소기에 물체를 수거하는 기능을 추가하여 일정 크기를 가지는 물체를 수거할 수 있다. 추가된 기능은 사용자가 로봇청소기를 운용하기 전에 청소 구역 내 물체를 정리하는 불편을 해소하여 사용자의 시간과 노력을 절약하고 편의성을 높일 것이다. 또한, 청소 구역 내 물체로 인해 물체 주변이 청소되지 않는 문제도 해결할 것이다. 기존의 로봇청소기는 물체를 인식하면 이를 회피하여 움직이기 때문에 물체 주변은 청소가 이루어지지 않아 청소의 효율성이 떨어진다. 제안한 장치는 이 물체를 수거한 이후 물체가 있던 위치와 그 주변을 청소할 수 있기에 효과적으로 청소할 수 있다. 청소 구역 내 물체로 인해 로봇청소기가 걸려 움직이지 않거나 흡입구가 막혀 고장이 발생하는 단점도 물체를 수거함으로써 해소할 수 있다. 청소 구역 내 물체를 청소하면서 수거하기 때문에 영유아 혹은 애완동물이 있는 장소에서 작은 물체로 인한 안전사고를 방지할 수 있을 것이다.

본 장치는 사용자의 로봇청소기를 운용하기 전에 정리해야 하는 불편을 해소하기 위한 목적으로 설계되었다. 따라서, 로봇청소기 운용 전 1차 정리에 대해 불편을 느끼는 사용자에게 효과적인 대안이 될 것이다. 또한, 청소 구역 내 작은 물체가 많거나 사용자가 확인하기 어려운 청소 구역에서 물체를 수거해오는 것에도 효과적일 것이다. 로봇청소기에 물체 수거 기능을 추가하는 방향으로 본 장치를 제안했지만, 가정 및 실내에서 사용되는 로봇청소기가 아닌 다른 장소에서도 본 설계가 적용될 수 있을 것이다. 제안한 장치의 크기 및 강도를 높인다면 산업현장이나 재난 상황 등 사람의 접근이 쉽지 않은 곳에서 표적 물체나 사람을 구하는 상황에 해당 기능이 사용될 수 있을 것이다. 이 외에도 ‘조건에 맞는 물체를 식별하여 수거하는 기능’이 필요한 곳이라면 해당 설계가 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 설계는 충남대학교 이경민 교수의 학술연구비 지원을 받아 진행되었음. 또한, 충남대학교 LINC 3.0 사업단 및 공학교육혁신센터의 ‘캡스톤디자인 제작비 지원’을 받아 진행되었음.

참고문헌

(1) 여성가족부, 2021, “2020년 가족실태조사 분석 연구”, p356.
(2) “Gfk, 2022년 국내 로봇 청소기 시장 성장률 발표…2021년 대비 41% 성장”, (2023.03.20.), 뉴스와이어, https://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=963436
(3) “"로봇 청소기에도 단점은 있다?" 로봇 청소기 구입 전 알아야 할 6가지 특징”, (2020.05.04.), itworld, https://www.itworld.co.kr/news/151624
(4) Mantriota, G., 2006, “Theoretical model of the grasp with vacuum gripper,” Mechanism and Machine Theory, Vol. 42, No. 1, pp. 2~17.
(5) Yu, H. S., Kim, M. C., and Song, J. B., 2014, “Tendon-driven Adaptive Robot Hand,” Journal of Korea Robotics Society, Vol. 9, No. 4, pp. 258~263.
(6) Kim, J. I., 2018, A Tendon-driven Under-actuated Robotic Hand having Neutral Posture for Efficient Grasping, Korea University of Technology & Education, Cheonan.
(7) Tamamoto, T., Takeuchi, K., and Koganezawa, K., 2018, “Development of Gripper to Achieve Envelope Grasping with Underactuated Mechanism Using Differential Gear,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 30, No. 6, pp. 855~862.
(8) Byun, S. J., Hwang, M. J., 2022, “Adaptive Gripper with Magnetic Gear for Grasping Atypical Objects,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 28, No. 12, pp. 1147~1154.
(9) Size Korea, 2023, “Finger length of Korean between 20 ~ 69”, https://sizekorea.kr/human-meas-search/human-data-search/meas-item.

(10) Yu, H. S., Kim, M. C., and Song, J. B., 2014, “Tendon-driven Adaptive Robot Hand,” Journal of Korea Robotics Society, Vol. 9, No. 4, pp. 258~263.

(11) Seung Jae Byun, Myun Jo (2022). “Adaptive Gripper with Magnetic Gear for Grasping Atypical Objects.” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 28(12), pp.1147-1154

(12) Mathew, A. T., Hussain, I., Stefanini, C., Hmida, I. M. B. and Renda, F., 2021, “ReSoft Gripper: A reconfigurable soft gripper with monolithic fingers and differential mechanism for versatile and delicate grasping,” IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), New Haven, CT, USA, pp. 372~378.

(13) Salvietti, G., Iqbal, Z., Hussain, I., Prattichizzo, D. and Malvezzi, M., 2018, “The Co-Gripper: A Wireless Cooperative Gripper for Safe Human Robot Interaction,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, pp. 4576~4581

(14) Han, S., Chon, S., Kim, J., Seo, J., Shin, D. G., Park, S., Kim, J. T., Kim, J., Jin, M., Cho, J., 2022, “Snake robot gripper module for search and rescue in narrow spaces,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 7, No. 2, pp. 1667~1673.

(15) Kruse, L. and Bradley, J., 2018, “A Hybrid, Actively Compliant Manipulator/Gripper for Aerial Manipulation with a Multicopter,” IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Philadelphia, PA, USA, pp. 1~8.

(16) Wang, Z., Torigoe, Y. and Hirai, S., 2017, “A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 2, No. 4, pp. 1909~1916.

(17) Moon, S. Y. and Hwang, M. J., 2022, “An Adaptive Soft Gripper for Fruit Harvesting,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 28, No. 7, pp. 664~670.

(18) Zhou, J., Chen, X., Li, J., Tian, Y. and Wang, Z., 2018, "A Soft Robotic Approach to Robust and Dexterous Grasping," IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft), Livorno, Italy, pp. 412~417.

(19) Hussain, I., Malvezzi, M., Gan, D., Iqbal, Z., Seneviratne, L., Prattichizzo, D. and Renda, F., 2020, “Compliant gripper design, prototyping, and modeling using screw theory formulation,” The International Journal of Robotics Research, Vol. 40, No. 1, pp.55~71.

(20) Hussain, I., Salvietti, G., Spagnoletti, G. and Prattichizzo, D., 2016, “The Soft-SixthFinger: A Wearable EMG Controlled Robotic Extra-Finger for Grasp Compensation in Chronic Stroke Patients,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 1, No. 2, pp. 1000~1006.

(21) Salvietti, G., Hussain, I., Cioncoloni, D., Taddei, S., Rossi, S. and Prattichizzo, D., 2016, “Compensating Hand Function in Chronic Stroke Patients Through the Robotic Sixth Finger,” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 142~150.

(22) Chen, F. Y., Lin, T. H., Lu, C. H., Wu, H. Y., Huang, S. and Lau, G. K, 2021, “Lightweight Bionic Robotic Arms Using Hoop- Reinforced Dielectric Elastomeric Actuators,” International Journal of iRobotics, Vol. 4, No. 3, pp. 31~38.

(23) thang010146, (2016. Feb. 29), Mechanical telescopic cylinder 1 [video], Youtube, https://www.youtube.com/shorts/jWxARpHUVrg.

(24) “Compare Cameras”. IntelRealsense. https://www.intelrealsense.com/compare-depth-cameras/.

(25) “darknet_ros”. leggedrobotics. https://github.com/leggedrobotics/darknet_ros

(26) Lee, J. I., Gil E., Kim H. J., Lee J. W.,2022. “Self-driving trash can robot using Deep learning”, ACK 2022 (Annual Conference of KIPS) Vol. 9, No. 02, pp. 0824~0826.

(27) Kim. S. W., 2005. “A study on implementation of home mess-cleanup robot”, Journal of Korean instituteof information technology, Volume 3, Issue 1, pp. 114~119.