

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-AB.2014.38.0.000>

ISSN 1226-0000

2288-0000(Online)

행성 탐사 로버 배터리 자동 교체 시스템 개발

김학중* · 민선기*[†] · 박경훈** · 유상은**[†] · 진상민*** · 홍창민***[†]
(지도교수 : 장대성)

* 한국항공대학교 항공 우주 및 기계공학과

Planet exploration rover battery automatic replacement system development

Hak Jung Kim*, Sun Ki Min*[†], Kyoung Hoon Park**, Sang Eun Yoo**[†], Sang min Chin***
and Chang Min Hong***[†]

* Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Nat'l Univ.

(Received July 8, 2020 ; Revised July 9, 2020 ; Accepted July 10, 2020)

Key Words: System Engineering(시스템 엔지니어링), Micro Controller Unit(마이크로 컨트롤러), Path Plan(경로 계획), Robot Arm(로봇팔), Manipulator(매니퓰레이터) Kinematics(기구학) End-Effector(엔드이펙터), Mechanical Engineering Design(기계설계)

초록: 배터리 교체가 필요한 상대 로버 근처에서 주어진 방향 정보를 이용하여 사용된 배터리를 수거하고, 동체에 장착된 배터리를 꺼내어 상대 로봇에 삽입하는 다관절 로봇팔을 구현을 목표로 제작하였다. 시스템 엔지니어링 개념을 통하여 제한된 예산과 시간동안에 로봇팔 제작을 실시하였다. 실제 모델의 구동 환경은 지구가 아닌 화성을 목표로 하였기 때문에 지구에서의 구동 가능한 모델의 재료와 크게 상이하다. 제작시간 및 제작비용을 고려하여 실제사이즈와 동일한 Mock-Up 모델을 제작하였다.

Abstract: The goal was to implement a multi-joint robot arm that collects the used battery by using the given direction information near the opponent rover that needs to replace the battery, takes out the battery mounted on the fuselage and inserts it into the opponent robot. Through the concept of system engineering, the robot arm was manufactured for a limited budget and time. Since the driving environment of the actual model is aimed at Mars, not Earth, it is significantly different from the material of the model that can be driven on Earth. In consideration of the production time and production cost, the same mock-up model was produced.

[†] Corresponding Author, dsjang@kau.ac.kr

© 2020 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

1.1 Requirement

- 1) 500g의 배터리팩을 잡아서 하나의 장착 위치에서 분리하고 다른 장착 위치에 삽입 및 결합할 수 있어야 한다.
- 2) 60초 이내에 자차의 배터리 팩을 꺼내고 상대 로버의 빈 장착 위치에 삽입해야 한다.
- 3) 60초 이내에 상대 로버의 배터리 팩을 꺼내고 자차의 빈 장착 위치에 삽입해야 한다.
- 4) 배터리 수거와 삽입은 자차에서 전방 좌우 $\pm 45^\circ$, 거리 20cm~60cm 범위에 있는 상대 로버에 대해 수행할 수 있어야 한다.
- 5) 로봇팔 및 그 지지대와 제어 장치의 총 질량은 4kg 이내여야 한다.
- 6) 로봇팔은 운용될 환경 조건을 만족해야 한다.

1.2 Mission Statement - Hardware

로봇팔의 제어 특성과 여러 변수는 단순히 프로그램 상에서만 발생하는 것이 아니라, 설계과정과 실제 제작과정의 차이에서도 기인한다. 아무리 설계가 이상적으로 잘 되어 있다 한 들 제작과 조립을 고려하지 않았을 때, 자원 낭비로 이어지며 이는 프로젝트를 진행함에 있어서 시간 지연 요소로 작용할 것이다.

이번 임무에 요구되는 로봇팔은 우주환경 내지 타 행성에서 정상적인 운용이 가능한 로봇팔로, 자중의 최소 1/8에 해당하는 물체를 자유롭게 Pick & Place가 가능해야 한다. 이를 충족하기 위해서는 다음과 같은 제약조건이 따른다.

- 더 가벼운 로봇팔은 우주환경까지의 운송비를 절약하는데 기여한다.
- 심한 온도차에서도 정상적인 작동이 가능해야 한다.
- 기계적으로 충분한 강도를 가져야 한다.
- 임무수행 범위 내에서 자유로운 동작 및 임무수행이 가능해야 한다.

1.3 Mission Statement - Simulation

로봇팔이 원하는 효율적으로 원하는 운동을 수

학 공식적으로 계산하며 미션을 수행할 수 있도록 로봇팔의 특성을 조절하는 역할을 한해야 한다. 물체를 자유롭게 Pick & Place 하기 위해서 최적의 설계를 하기 위해서 다음과 같이 진행하고 있다.

- 로봇팔 모델링을 통해 좌표축 및 이동행렬을 결정한다.
- 자코비안(Jacobian) 행렬식 계산을 통해 각 조인트의 회전각과 각 링크 길이를 통한 엔드이펙터의 위치 및 자세를 유도한다.
- 엔드이펙터가 이동할 경로의 좌표를 시간축에 대하여 정의하는 Path-plan
 - Wrist의 path-plan
 - 엔드이펙터의 path-plan
- 시뮬레이션 수행
- 카메라로부터 입력받은 정보에 대한 정보를 받아 그에 맞게 path-plan을 계산하고, 동작을 어떤 순서로 진행할지에 대해 흐름 전개

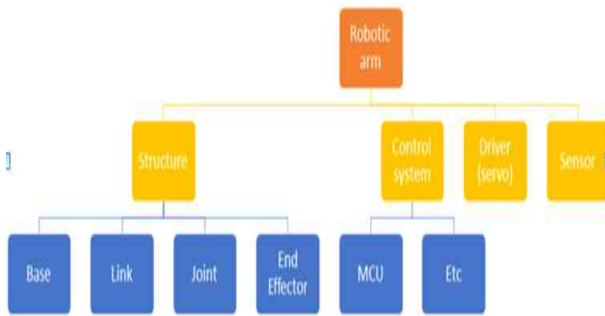
1.3 Mission Statement - Software

로봇팔을 원하는 운동으로 작동시키기 위해서는 적절한 코딩과 그에 알맞은 프로세서가 필요하다. 이를 충족시키기 위해서 소프트웨어팀은 다음과 같은 기술을 충족시켜야 할 것이다.

- 프로세서 선정 및 프로세서에 알맞은 코딩 능력 발전
- 영상정보를 받기 위한 통신
- 정보를 통하여 서보를 구동
- 순차적인 동작을 구동하기 위한 알고리즘

1.4 PBS

우리는 Design을 체계적으로 알아보기 위해 PBS를 작성하였고 다음과 같다.



- Structure: 로봇팔의 기계적인 구조
- Base: 로봇팔이 설치될 지지대
- Link: 관절과 관절을 이어주는 팔
- Joint: 구동기를 설치해 움직임을 만들어내는 관절부품
- End effector: 로봇팔의 끝에 달려 배터리를 교환하는 작업(Ex. grip, rotate)을 수행하는 장치(ex. Gripper or em holder)
- Control system: Driver의 제어를 수행하기 위하여 필요한 회로 등을 포함한 전자장비들의 집합
- MCU: 마이크로 컨트롤러 유닛. 프로그램이 설치되어 구동기에 신호명령을 내리는 장치
- Driver: 구동기. Control system의 신호를 받아 움직임을 만들어내는 장치 (Ex. Servo, linear motor, 유압장치 등)
- Sensor: 제어에 필요한 각종 외부 정보들을 수집하는 장치

1.5 V Shape Diagram

Requirements 중 설계 및 제작에서 가장 중요하게 고려해야 할 부분은 1, 4, 5, 6번이며, 2번 및 3번의 달성을 위해서는 설계가 소프트웨어 디자인에 대하여 친화적일 필요가 있다. 다시 말해 모든 조건을 고려해야 하며, 이를 고려한 V-shape diagram은 아래와 같다.

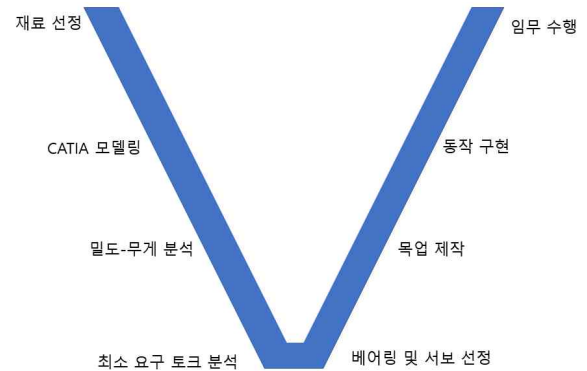


Fig. 2 Hardware Design V shape diagram

2. 본 론

2.1 design model weight expectation

무게 대비 payload 조사: 우리는 설계를 시작하기에 앞서서 로봇 팔이 과연 500g을 들려면 어느 정도의 무게여야 하는지 알아보기 위해서 자료를 찾아 10kg 미만의 사례 중 10개를 선택하여 보간한 결과 다음과 같이 얻을 수 있었다,

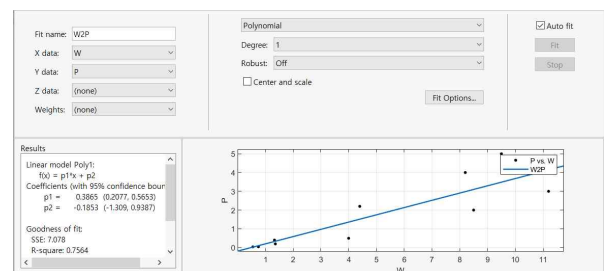


Fig. 3 weight-payload root mean square plot

식에 4kg을 대입한 결과 충분히 500g을 이상을 들 수 있다는 결과가 나왔다.

2.2 Hardware

2.2.1 Material Selection

로봇팔의 재질은 무게와 페이로드에 따라 적절히 선정해야 한다. 또한, 지상에서 운용되는 로봇암과 달리 항공우주분야에서 운용하는 로봇팔은 무게가 운용 효율과 직결되어 로봇팔 자체의

무게에 대한 합리적 고려가 필요하다. 따라서 재질 선정에 앞서 고려할 수 있는 재료들과 화성탐사선 Curiosity의 로봇팔에 사용되었던 재료를 주요 특성에 따라 정렬하였다.

	Ti6Al-4V	Al-7075	AS4/3501-6	PEEK	AL6061
밀도 (g/cc)	4.43	2.81	1.60	1.26-1.50	2.70
탄성계수 (GPa)	-	71.7	147, 10.3	2.2-6.48	68.9
인장강도 (Mpa)	896	276	2280	48-265	117
극한 인장 변형률 (%)	-	17	1.5	1.5-110	25
열팽창계수 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-	23.6	-0.9	4.7-600	25.2

Table. 1 materials used in Curiosity, Mars Probe, and Properties of CFRP(UD type) and PEEK

인장강도 및 열팽창계수만 고려한다면 CFRP인 AS4/3501-6이 월등한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 재질에 비하여 이방성 재질이고 단가가 비싸며, 충격에 의한 재료의 파괴가 지속적으로 진행되는 점으로부터 우주쓰레기 및 행성 내 모래폭풍 등의 외부 충격에 취약하다고 판단하였다.

Ti6AL-4V은 티타늄 특수합금으로서 물성이 뛰어나지만 가공이 어려워 단가 상승이 예상되며, 재료를 구하는 것 부터가 쉽지 않다. Al 7075의 경우 특수한 경우를 제외하고 대중적으로 사용되지 않아 제한된 예산 하에서 실제 제작에 활용하기 어렵다고 판단하여 Al6061을 주 재료로 선정하였다.

2.2.2 Design

2.2.2.1 Robot arm design

로봇팔의 형상은 임무수행을 위해 최적화되어야 한다. 또한 제한된 예산 내에서 Requirement를 만족하기 위해서는 재료를 고려한 설계가 필수적이다.

앞서 로봇팔의 주재료를 Al6061으로 하기로 하였으므로 이를 기반으로 요구되는 로봇팔의 링크 규격을 단순 보 가정을 통해 구하였다.

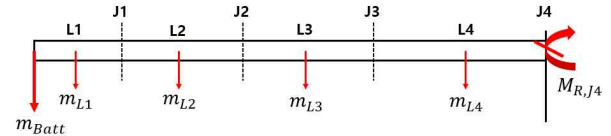


Fig. 4 단순 보 가정, 집중하중으로 가정한 로봇팔의 링크

안전계수를 4로 하였을 때, Al6061을 재료로 하는 원형 링크의 규격은 D25 1T이다. 또한, 이때 각 조인트에 가해지는 토크는 다음과 같다.

	서보무게 (g)	암 무게 (g)	암 길이 (cm)	총 모멘트 (kg.cm)
J4	135	250	12	9.48
J3	60	112	20	30.1
J2	65	128	20	54.42
J1	900	171	30	122.01

Table. 2 The amount of torque applied to the joint

이러한 결과를 기반으로 서보를 선정하고, CATIA를 이용하여 모델링 한 결과는 아래와 같다.



Fig. 5 Final design completed/manufactured Robot arm model

이때 재료는 PLA(Polylactic Acid)를 사용했으며, 이는 실제 모델에서는 사용하지 않는 재료이지만, 프로젝트의 기한이 최대 1년인 점, 예산이 학기당 최대 100만원으로 한정된 점, 충분한 해석 및 선행 연구가 진행되지 못한 점으로부터 프로젝트 진행과 함께 모델링의 수정이 불가피하므로 3D printer를 이용해서 설계 수정 및 즉시 반영을 통해 단기간에 목표를 달성하기 위해 사용하였다.

2.2.2.2 End-Effector Design

-Requirements

배터리팩을 잡고 배터리팩의 무게+로봇팔 작동시의 관성력을 견딜 수 있어야 한다. 전체질량은 200g 이하여야 한다.

-설계품 추정

설계에 앞서 시판중인 엔드이펙터의 설계를 살펴 보았다. 그 결과 공통적인 구조를 발견하였다.

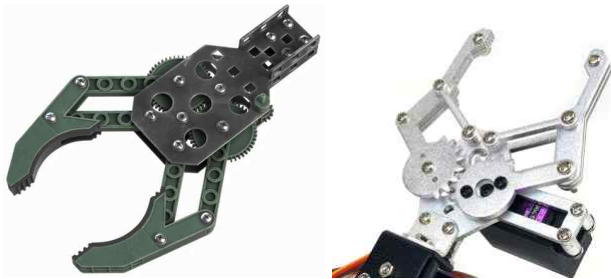


Fig. 6 Commercial end-effector

위와 같이 두 개의 평행한 링크가 그립퍼에 연결되어 작동하는 방식이다. 그립퍼가 서로 대칭하게 동작하기 때문에 내부 기어도 대칭구조로 되어있다. 위의 구조를 토대로 설계하였다.

-그립과정에서 배터리팩 그립과의 간섭 해결

그림에서 표현된 바와 같이 그립퍼는 링크의 길이를 반지름으로 하는 원호를 그리며 움직인다. 이 과정에서 배터리 그립과 그립퍼와의 간섭을 방지하려면 그립퍼가 그리는 자취를 따라서 배터리팩의 그립을 설계하거나 반대로 배터리팩의 그립이 그리는 자취를 따라서 배터리팩을 설계하여

야 한다. 배터리팩의 그립부분이 이미 설계가 되어있었기 때문에 후자를 택하였다.

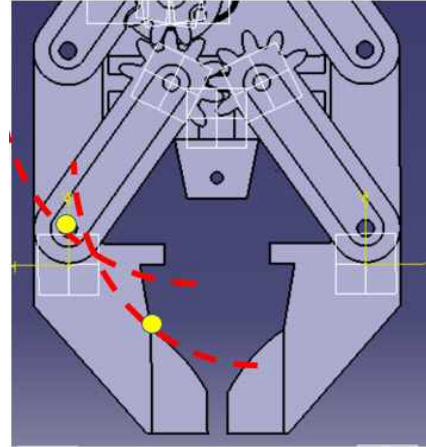


Fig. 7 Trajectory of gripper

- 배터리팩 하중에 의한 토크 계산

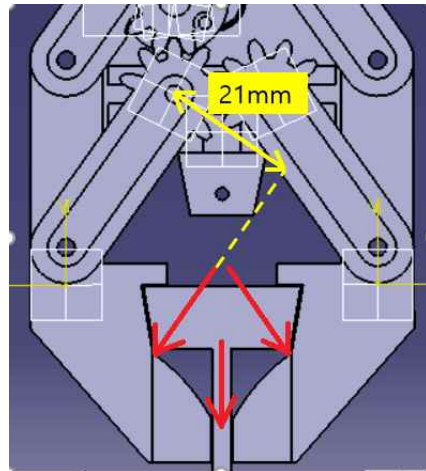


Fig. 8 Load applied and Moment arm

그림처럼 배터리팩을 잡았을 시에 배터리팩의 하중의 작용점의 모멘트암의 길이는 21mm 이다. 하중과 모멘트를 정역학적으로 계산해보면 다음과 같다.

$$2F\cos 55^{\circ} = 550g \times 9.81m/s^2$$

$$F = 4.70338 N$$

대칭구조이기 때문에 양쪽에 하중이 걸리는 것을 고려하면 총 모멘트는 다음과 같다.

$$M = 2Fr = 2 \times 4.70338 N \times 0.021m = 0.19754 Nm$$

서보모터의 사양이 2.8~3.4 kg·cm 이므로 여유가 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 기어비 1:1 이 충분한 것으로 판단하였다.

- 내부 기어 설계

다음은 인벌류트치형을 그리기 위한 수치이다.

잇 수 N	10
피치지름 d	15 mm
입 력 각 a	20 deg
모 들 $m = \frac{d}{N}$	$m = 1.5$ mm
기초원지름 $d_b = d \cos\left(\frac{a\pi}{180}\right)$	$d_b = 14.0954$ mm
디텐덤지름 $d_r = d - 2.5m$	$d_r = 11.25$ mm
어텐덤지름 $d_o = d + 2m$	$d_o = 18$ mm

Table. 3 Gear Design Data

위 수치를 가지고 인벌류트 곡선을 그리고 기어를 모델링하였다. 아래는 전체 모델링 결과이다

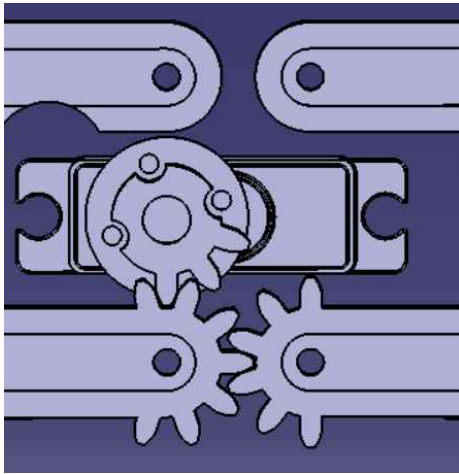


Fig. 9 Internal Gear structure

기어를 회전시켜가며 이의 간섭이 없음을 확인하였다. 서보모터와 연결된 기어는 작동각도 55° 에 필요한 이를 빼고 생략하였다.

2.2.3. Feature

이러한 로봇팔을 제작하는 과정에서 발생 가능한 이슈들을 빠르게 피드백하기 위해선 높은 수준의 유지보수성이 요구되며, 이를 위해 전 파트 볼트-너트 체결 방식을 통해 조립하였다. 볼팅 과정에서 발생하는 마찰열에 의해 3D Printer 출력물이 적절히 변형되어 결합을 보다 단단하게 유지할 수 있었으며, 결합강도가 충분하지 않은

곳에는 플렌지 너트를 이용해 체결하여 스스로 풀리지 않도록 하였다. 또한 3d Printer 출력 시 불필요한 Support 생성에 의한 원재료 및 시간, 인적 자원 낭비를 방지하기 위하여 설계 단계에서 서포트가 요구되지 않는 구조를 설계하는 것을 최우선 순위로 디자인하였다. 이를 위해 z축 방향에서 형성되는 빈 공간을 최소화하고, 출력 시에 적절한 온도 및 밀도 설정과 함께 서포트가 형성되는 각도를 조절하여 출력함으로써 보다 높은 수준의 결과물 생산이 가능했다.

서보모터에 의한 동력전달의 경우, 소형 서보모터의 축으로 사용되는 스파인으로부터 출력한 조인트가 미끄러지지 않게 하고, 반복된 움직임으로 인해 마모되는 것을 방지하는 것이 중요하다. 또한 기어 등 추가 부품이 늘어날수록 동력 전달 효율이 감소하므로, 최대 동력 전달을 위해서는 직접 연결하는 방식이 제일 높은 기계효율을 가진다. 이러한 점으로, 기성 서보 혼을 설계 형상에 맞게 변경하여 사용함으로써 발생할 수 있는 부품의 마모, 동력전달 효율 문제 등을 해결하였다. 또한 이러한 축이 작고 축에 수직한 힘에 약하여 축 변형, 더 나아가 서보 모터 파손 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 반대편에는 이러한 수직한 힘에 의한 변형을 막아줄 축을 AL6061 축을 D-shape 가공하여 추가로 설치하였으며, 축 방향 수직하중에 의한 처짐, 흔들림 등을 해결할 수 있었다.

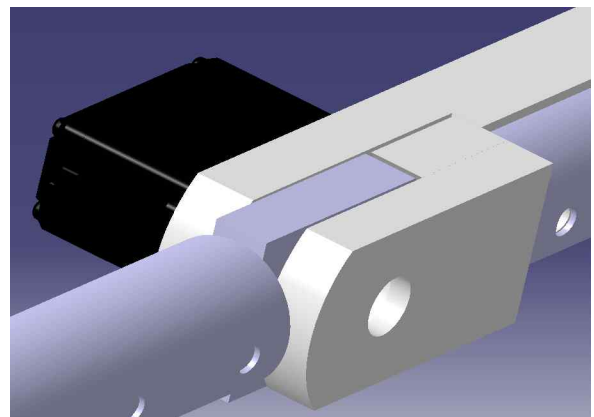


Fig. 10 Structure to prevent deformation by axial normal stress.

기저부의 경우, 작은 변형이 가장 큰 오차로 나타나는 부분이므로 이를 방지하기 위한 롤러가이드를 90° 마다 설치하여 기저부 판의 구조적인 특성에 의한 흔들림을 방지하였다. 헤드에 8mm

베어링의 일부분이 노출되어있어, m6볼트를 이용하여 롤러가이드를 조립하게 되면 이러한 힘에 의해 베어링과 회전 플레이트가 접촉하게 된다. 이를 적절히 조절하면 흔들림을 잡는 동시에 원활한 동작을 가능하게 할 수 있다.

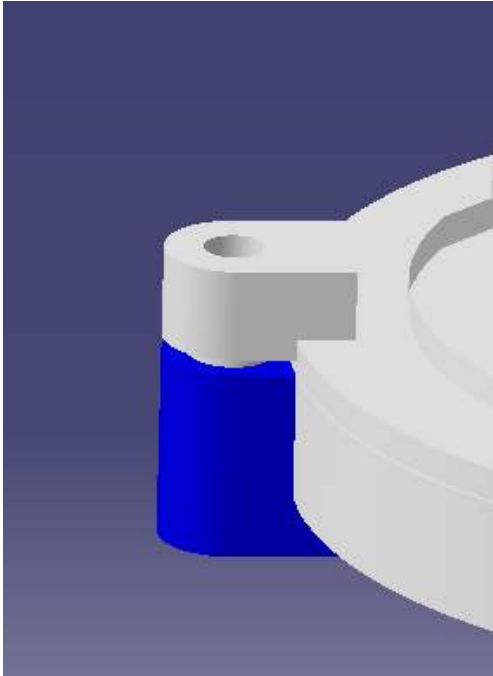


Fig. 11 Roller guide mounted on the base plate

2.3 Simulation

Requirements를 만족하도록 개념설계를 구체화하고, 실제 제작에 앞서 가상의 정보를 가지고 실제로 작동하는 일련의 과정을 구상 및 테스트해보아야 한다. 시뮬레이션은 하드웨어 없이도 테스트할 수 있으며, 알고리즘을 개발하고 시험하기 위해 필요하다. 시뮬레이션을 통하여 업무분담 및 테스트가 수월해질 수 있다.

2.3.1 Modeling

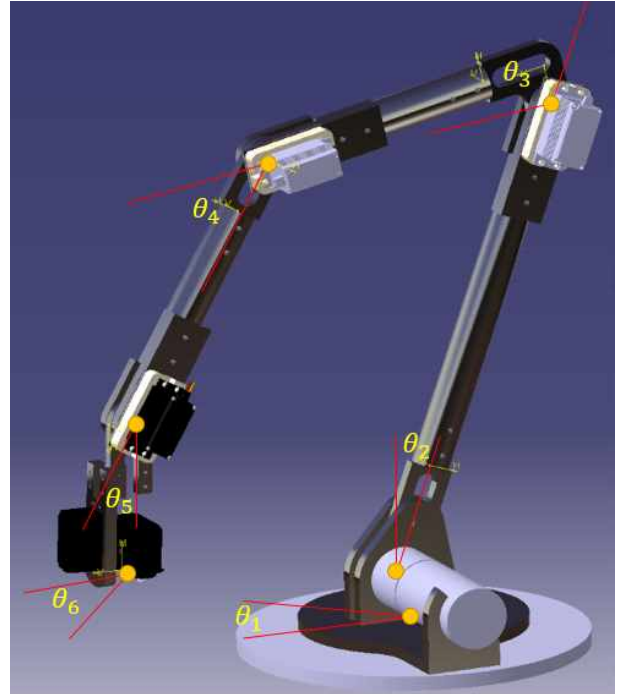


Fig. 12 Robot Arm

우선 6자유도로 모델링 하였다. 그 이유는 다음과 같다.

- ① 5자유도의 경우 엔드이펙터와 지지대를 제외한 로봇팔이 2자유도이므로 로봇의 자세와 위치에 대한 유연한 대응에 한계가 있다.
- ② 로봇의 자세에 따라 엔드이펙터의 자세를 변화시켜야 하므로 θ_6 회전도 필요하다.

먼저 카티아로 전체적인 형상을 그려보고 이를 토대로 로봇공학 정기구학 스터디를 진행한 후 Universal 좌표계에서 엔드이펙터 좌표계까지의 Transformation 행렬을 만들어 보았다. 이를 통해 엔드이펙터의 자세와 위치를 알 수 있다. Transformation 행렬은 다음과 같다.

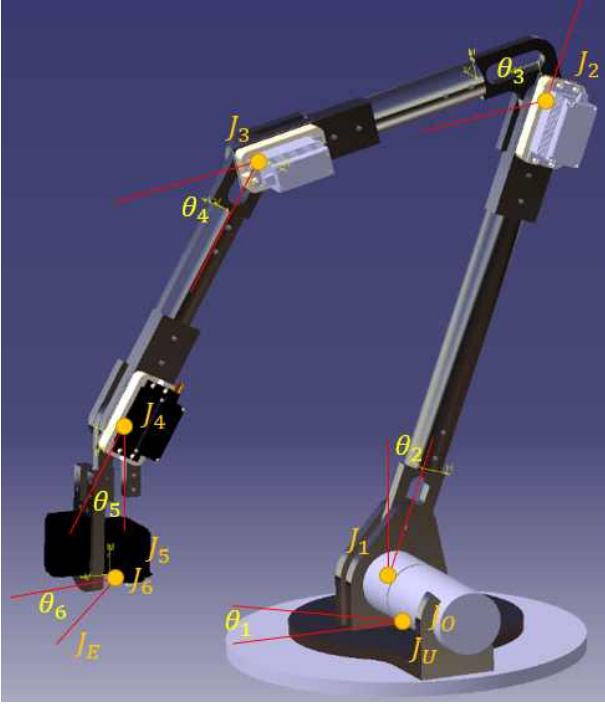


Fig. 13 Robot Arm

Ju=정면을 x, 왼쪽을 y, 위를 z로 하는 FLU좌표계로 설정
 J0= θ_1 로 yaw 회전을 한 좌표계
 J1=지지대로부터 높이만큼 이동한 좌표계
 J2= θ_2 로 pitch 회전 후 L1길이방향으로 J2까지 이동한 좌표계
 J3= θ_3 로 pitch 회전 후 L2길이방향으로 J3까지 이동한 좌표계
 J4= θ_4 로 pitch 회전 후 L3길이방향으로 J4까지 이동한 좌표계
 J5= θ_5 로 pitch 회전 후 L4길이방향으로 J5까지 이동한 좌표계
 J6= θ_6 로 yaw 회전 후 L5길이방향으로 J6까지 이동한 좌표계
 Je= θ_7 로 roll 회전 후 엔드이펙터 grip point까지 이동한 좌표계

위에서 J1에서 J2로 이동하는 과정에서 0T_1 을 공급해준다. 여기에서 x축 중심으로 -90 도 회전 후 y축 중심으로 -90 도를 회전한다. 이는 로봇 공학에서 통상적으로 x축을 링크길이 방향, z축을 조인트 회전축 방향으로 맞추기 때문에 이를 만족시키기 위함이다.

$$\begin{aligned}
 {}^uT_0 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & l_4c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & l_4s\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & l_5c\theta_5 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & l_5s\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_2c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & l_2s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & l_3c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & l_3s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^6T_E &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Fig. 14 Translation Jacobian Matrix

위 행렬을 모두 곱하게 되면 Universal 좌표계에 대한 엔드이펙터의 자세와 위치를 알 수 있다. 하지만 여기에서 지지대와 1번 조인트 사이의 거리와 엔드이펙터를 생략하여 단순화 시켜서 시뮬레이션을 진행하기로 하였다. 그 이유는 다음과 같다.

- ① 모두 계산할 경우 식이 매우 복잡해진다.
- ② 로버 배터리의 자세에 따라 엔드이펙터의 자세도 변하여야 한다. 이 경우 4 번 조인트의 좌표를 배터리에서 수직방향으로 엔드이펙터 길이만큼 떨어진 지점에 일치하도록 제어하는 것이 편하다.

단순화된 로봇팔을 FLU 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

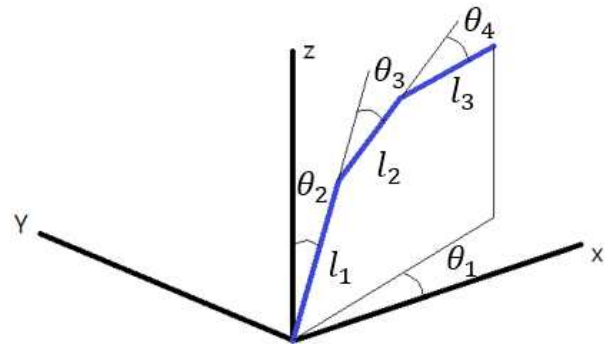


Fig. 15 Link coordinate

이를 토대로 끝점의 위치좌표를 계산하면 아래와

같다.

$$\begin{aligned} x &= [l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \cos \theta_1 \\ y &= [l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \sin \theta_1 \\ z &= l_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

θ_1 을 고정시키고 2차원화 시키면 아래와 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} x &= l_1 \sin \theta_2 + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ z &= l_1 \cos \theta_2 + l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

이를 전미분하게 되면 지지대와 각 조인트의 각도미소변화에 따른 끝점의 위치변화를 표현할 수 있다.

위 좌표계는 기저부부터 wrist까지의 정기구설계이다. wrist엔 end-effector가 부착되며 이의 설계는 구조팀에 할당된다. 링크4의 경우 배터리를 뿜고, 넣기 위해 항상 연직방향을 가리킨다. 개발속도를 높이기 위해 로봇암을 inversed 3-link로 단순화하여 시뮬레이션 개발을 수행하였다.

2.3.2 Jacobian Matrix

크게 두 경우로 path-plan을 나눠 이를 위한 wrist의 자코비안 행렬을 구해보았다. 위에서 구한 끝점의 위치좌표에 대한 식을 전미분한 후 $d\theta_1, d\theta_2, d\theta_3, d\theta_4$ 로 정리해주면 구해진다.

위치 자코비안의 경우

① $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 변화를 모두 고려한 경우 (동시제어)

$$J_{position} = \begin{pmatrix} -(l_1 s_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) s_1 & (l_1 c_2 + l_2 c_{23} + l_3 c_{234}) c_1 & (l_2 c_{23} + l_3 c_{234}) c_1 & l_3 c_{234} c_1 \\ (l_1 s_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) c_1 & -(l_1 c_2 + l_2 c_{23} + l_3 c_{234}) s_1 & -(l_2 c_{23} + l_3 c_{234}) s_1 & l_3 c_{234} s_1 \\ 0 & -(l_1 s_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) & -(l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) & -l_3 s_{234} \end{pmatrix}$$

② θ_1 을 상수로 놓고 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 변화만 고려한 경우 (시퀀스를 나눠서 제어)

$$J_{position} = \begin{pmatrix} l_1 c_2 + l_2 c_{23} + l_3 c_{234} & l_2 c_{23} + l_3 c_{234} & l_3 c_{234} \\ -(l_1 s_2 + l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) & -(l_2 s_{23} + l_3 s_{234}) & -l_3 s_{234} \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} dx_B \\ dy_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix}$$

위와 같은 형태의 행렬식이 구해진다. 패스플랜 정하고 위 자코비안 행렬의 역행렬을 구하여 양변의 왼쪽에 곱해주면 각 조인트의 각속도(양변을 dt로 나눠준다.)를 구할 수 있다.

자세 자코비안의 경우

① $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 변화를 모두 고려한 경우 (동시제어)

$$J_{orientation} = \begin{pmatrix} 0 & s_1 & s_1 & s_1 \\ 0 & c_1 & c_1 & c_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

② θ_1 을 상수로 놓고 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 변화만 고려한 경우 (시퀀스를 나눠서 제어)

$$J_{orientation} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

빠른 개발을 위하여 정기구학을 빠르게 진행할 필요가 있었으며, 이를 위해 링크4가 연직방향을 항상 가리키도록 하여 배터리 탈착 시 자세(orientation)역할을 수행하도록 하였다. 이를 통하여 링크 3개만 정기구학 계산을 하면 되었고, 자세 자코비안은 불필요하도록 하였다.

2.3.3 Path-Plan

- wrist의 path plan

우리는 wrist의 path plan을 동시에 제어 하는 방법과 나눠서 제어 하는 방법에 대해서 생각해 보았다. 모든 path plan은 5차 polynomial 방식을 사용하였다.

1) $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 을 동시에 제어하는 방법

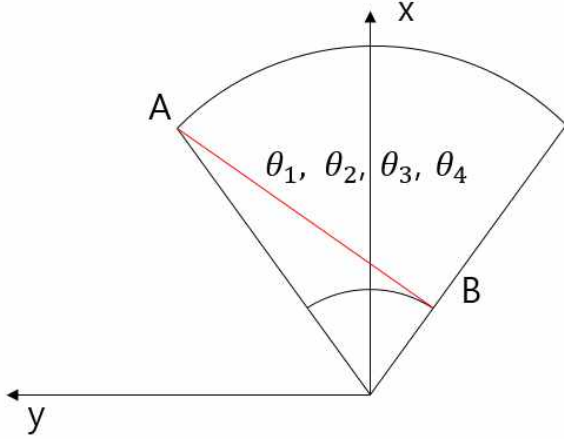


Fig. 16 Sequence Case 1

위 그림은 경로를 xy 평면에 정사영시킨 것을 나타낸 것이다. 목적지점 A와 B 사이를 직선으로 연결한 최단 경로(빨간색)를 따라 wrist를 이동시키는 것이다. $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 을 시간에 대한 함수로 정의하는 것이 필요하다.

※ 로봇팔이 두 지점 사이를 이동하면서 θ_1 가 변함에 따라 wrist와 원점사이의 거리가 점점 작아지게 된다. 이 경우 θ_1 의 각속도를 조절해줄 필요가 있다. 그리고 θ_1 의 변화에 따라 wrist의 위치가 결정된다. 이 상황에서 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 중에서 redundancy가 한 개 발생하여 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 값이 무수히 많아진다. 따라서 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 중 한 각도의 값을 정해주어야만 나머지 두 각을 유한하게 제어할 수 있을 것으로 예상된다. 시뮬레이션을 통해 이 제어가 가능한지 알아보고 만약 불가능하다면 자유도를 제한하여 나머지 두 각을 유한하게 제어하는 방법을 모색하기로 한다.

2) θ_1 제어와 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 제어를 시퀀스를 나눠서 하는 방법

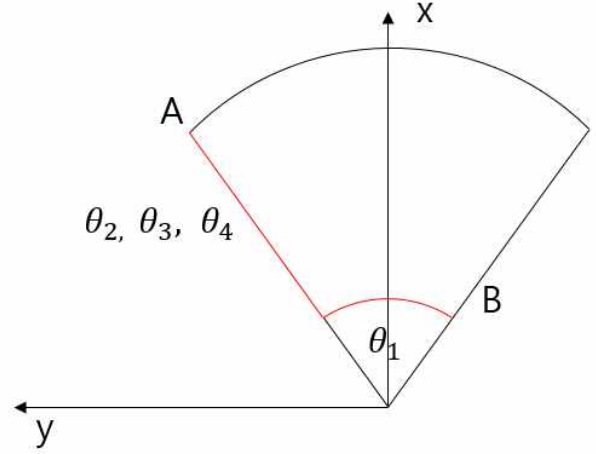


Fig. 17 Sequence Case 2

지지대 회전(θ_1)과 로봇팔 조인트회전($\theta_2, \theta_3, \theta_4$)을 나눠서 제어하여 목적지에 도달하는 것이다. 이 경우도 마찬가지로 wrist의 위치에 따른 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 값이 무수히 많다.

다만 나눠서 제어하므로 2차원화 되어 비교적 제어가 간단해진다. 하지만 경로가 길어져 임무 수행에 시간 소모가 커지는 단점이 있다.

각 방법의 장단점을 정리해 보면 다음과 같아진다.

	동시제어	시퀀스를 나눠서 제어
장점	경로가 짧다. 임무 수행 시간이 짧아진다. 배터리 소모가 적다.	연산이 비교적 간단하다. 제어가 쉽다.
단점	더 많은 연산이 요구된다. 제어가 어렵다.	경로가 길다. 임무 수행 시간이 길어진다. 배터리 소모가 크다.

Table. 6 Pros and Cons of path plan methods

최종적으로는 1)의 방식을 채택하였으며, pathplan과 역기구학(인버스 자코비안)을 이용하면 redundancy가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

2.3.4 Simulation Production Details

- ① 실제 모델 길이에 따른 링크 및 엔드 이펙터 표시
- ② 자코비언 행렬을 이용한 패스 플래닝
- ③ 배터리 교체 알고리즘에 따른 경로 설정
- ④ 배터리 교체 그림 구현
- ⑤ 제한 영역 설정

제한 영역 설정 고려 사항

- ① 링크의 길이를 통해서 나오는 최대 도달거리에 의한 제한 영역

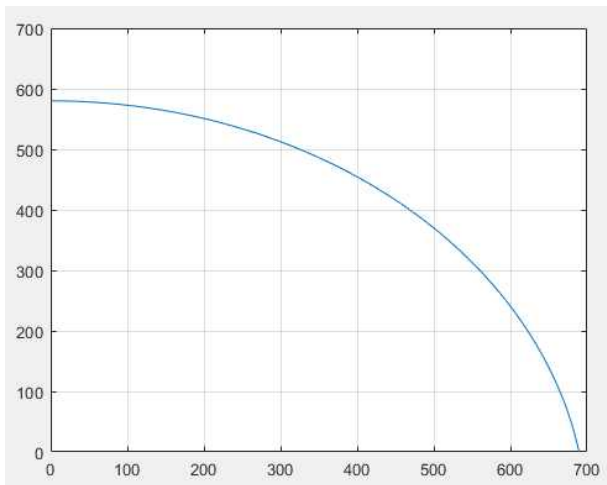


Fig. 18 Maximum Reach length

그래프의 원점이 기저부의 회전중심이며 곡선 이 내의 영역에서는 안정적인 이동이 가능하다.

- ② 구조적 한계의 각도 제한으로 인한 제한 영역

구조적 각도에 의해 최대각도 혹은 최소각도가 제한된다. 토크를 위해 서보 작동각도가 제한된다. 시뮬레이션을 통해 다양한 조합을 시도하여 임무지역을 만족하며 가장 넓은 작동범위를 가지도록 그리고 기저부 작동제한 영역이 배터리 보관함위치와 겹치지 않도록 가장 적절한 각도 제한을 선정하였다. 제한 각도는 아래와 같다.

각도를 제한하여 시뮬레이션한 결과는 아래와 같다. 파란 지역은 조인트 중 하나라도 작동범위를

$-85^{\circ} \leq \theta_2 \leq 90^{\circ}$ $<\text{범위: } 175\text{도}>$	$37^{\circ} \leq \theta_3 \leq 107^{\circ}$ $<\text{범위: } 70\text{도}>$
$1^{\circ} \leq \theta_4 \leq 142^{\circ}$ $<\text{범위: } 140\text{도}>$	$-40^{\circ} \leq \theta_5 \leq 90^{\circ}$ $<\text{범위: } 130\text{도}>$

Table. 7 Operating range of each joint

넘어서는 구역을 표시한 것이며, 검은 지역은 텅 빈 구역(물리적으로 링크의 길이가 부족하여 불가능한 구역)을 표시한 것이다.

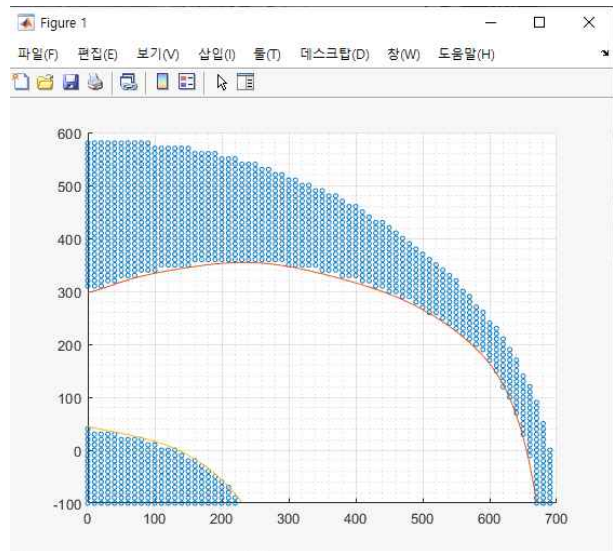


Fig. 19 Reach length limitation

위의 그래프의 결과를 통해 offset을 두고 polynomial line fitting하여 제한 영역을 설정하였다. 제한 영역에서는 로봇암이 작동하지 않으며, 목표지점을 재입력 하도록 하였다.

2.3.4 Simulation Sequence

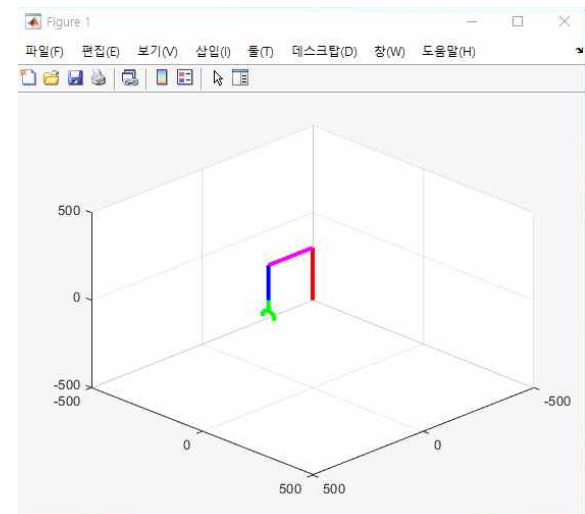


Fig. 20 Standby position

시뮬레이션이 시작되는 자세. MCU에서는 전원 인가시 서보/모터에 지나친 부하가 가지 않는 선에서 Standby position으로 향하도록 한다. Battery station 위치는 정해져 있다. x, y, z, θ_z 등 Charge station의 위치 및 자세를 입력받는다. (카메라 팀으로부터 데이터 입력에 해당) 시스템 단순화 및 복잡성 감소를 위하여 θ_x, θ_y 등은 0에 가깝다고 가정(즉 지면이 수평)하였다.

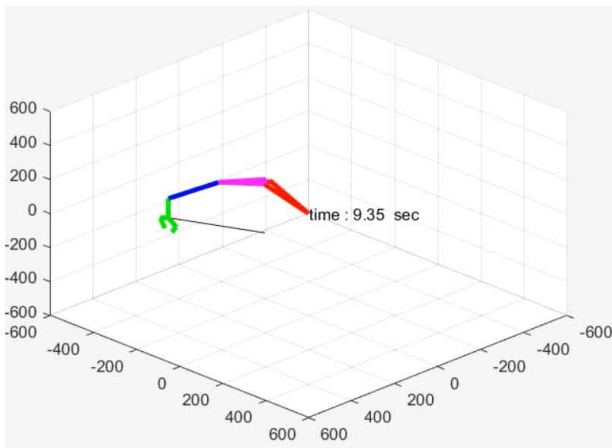


Fig. 21 Move to Charge Station Standby Position

입력된 x, y, z + 높이(예비지점)으로 이동

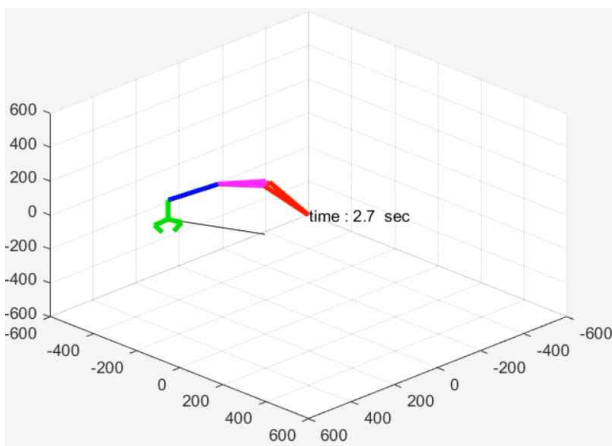


Fig. 22 End-Effector Rotate to fit θ_z

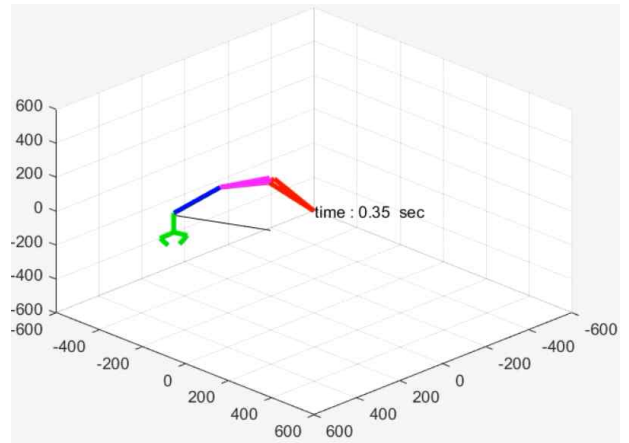


Fig. 23 Move as Battery Length

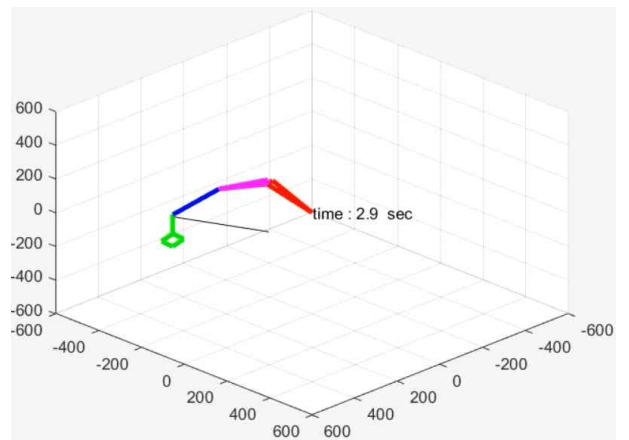


Fig. 24 Battery Grip

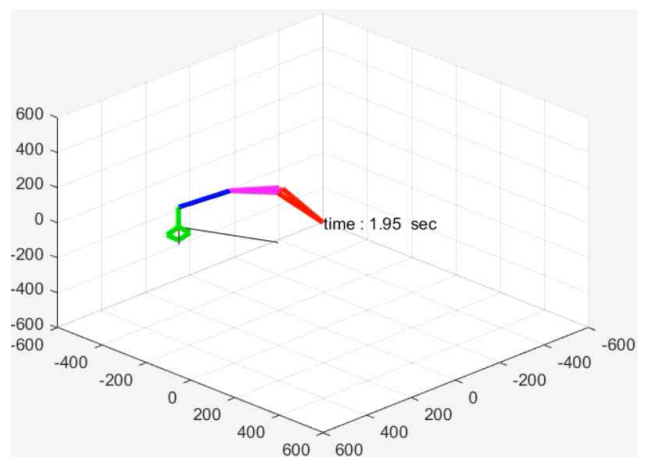


Fig. 25 Rise up as Battery Length

Charge station과 Battery 완전 분리

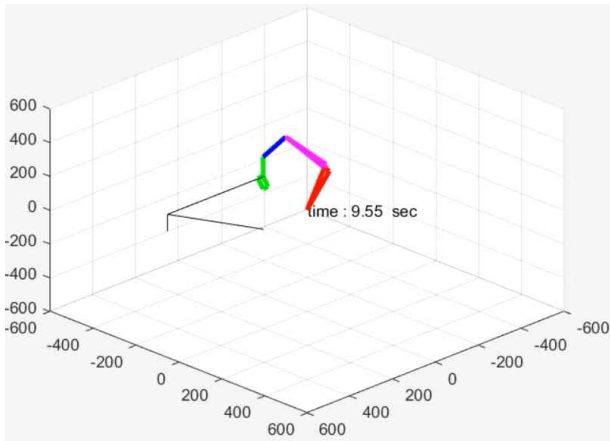


Fig. 26 Move to Empty Battery station Standby Position

충전된 Battery를 빈 Battery station 예비위치로 이동

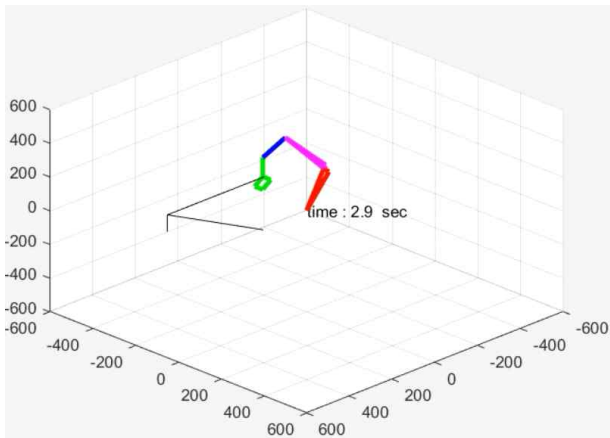


Fig. 27 Rotate End Effector as Battery degree

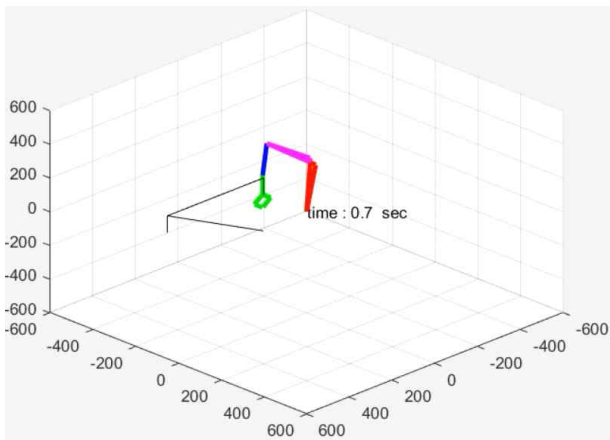


Fig. 28 Put Down Battery

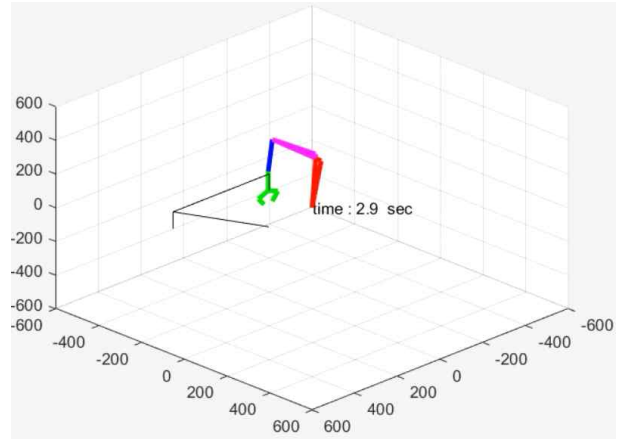


Fig. 29 Battery release

충전된 battery 장착

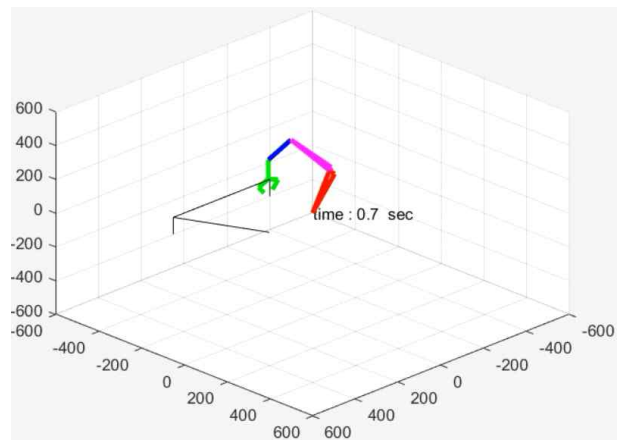


Fig. 30 Rise up

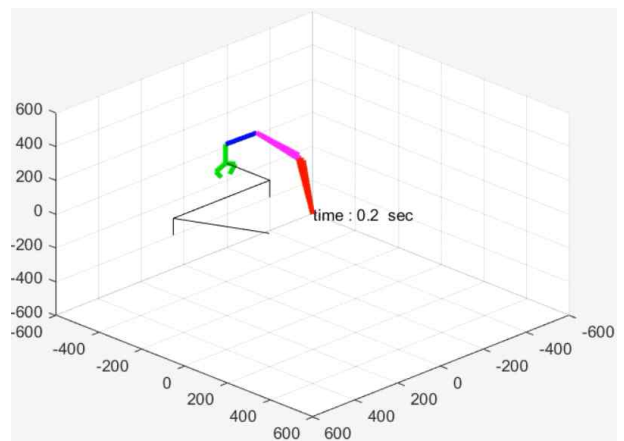
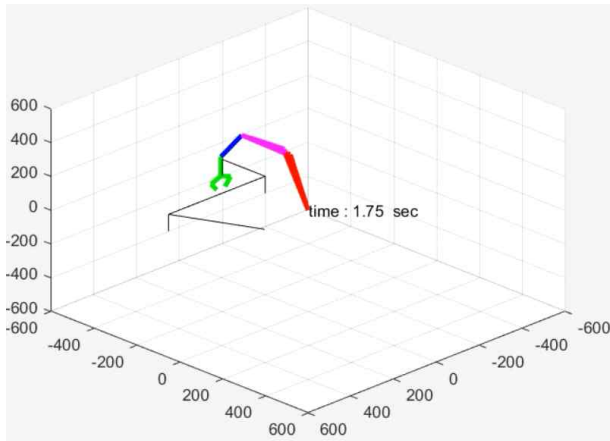
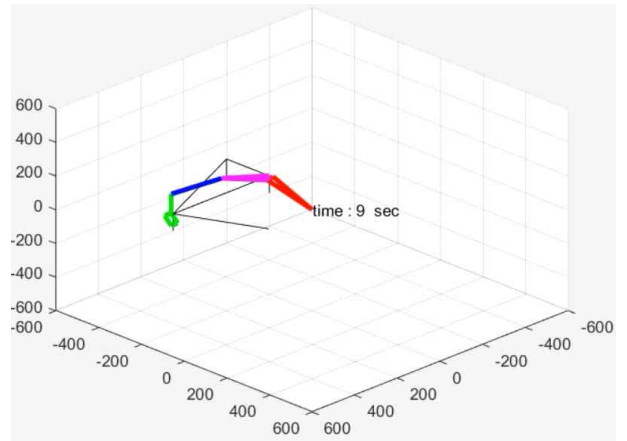
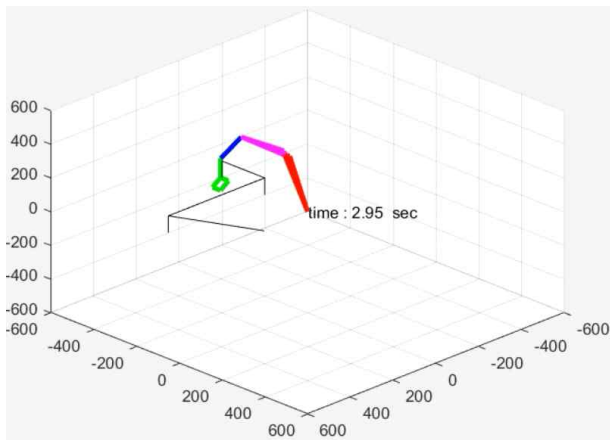
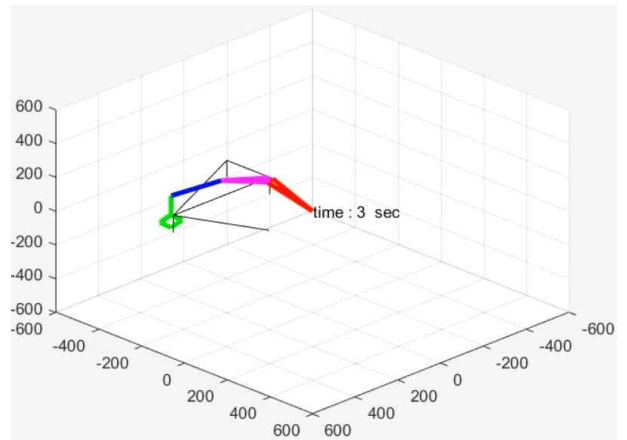
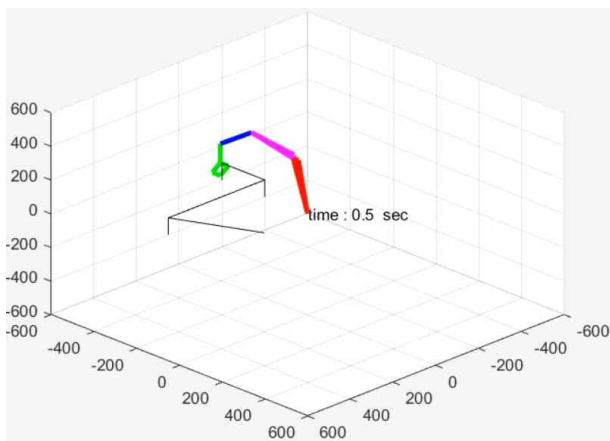
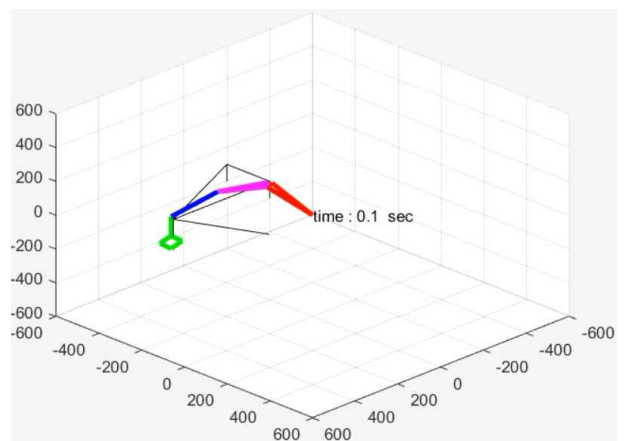


Fig. 31 Move to Discharged Battery Station

**Fig. 32** Put Down**Fig. 35** Carry Discharged Battery to Charge Station Standby Position**Fig. 33** Grip Discharged Battery**Fig. 36** Rotate End Effector to fit θ_z **Fig. 34** Rise Up**Fig. 37** Put Down

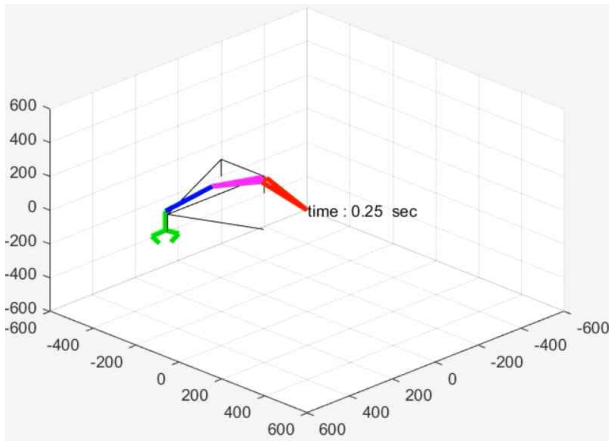


Fig. 38 Battery Release

충전시작

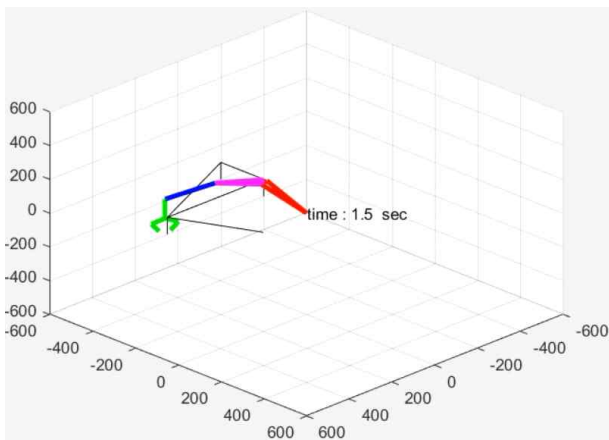


Fig. 39 Rise Up

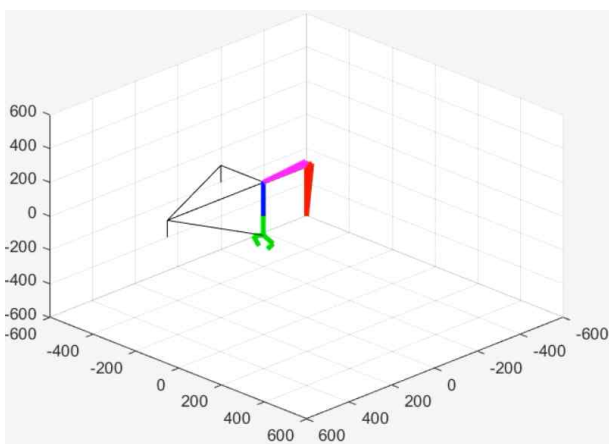


Fig. 40 Come Back to Standby Position

다음 명령 대기.

2.4 Software

2.4.1 Hardware configuration

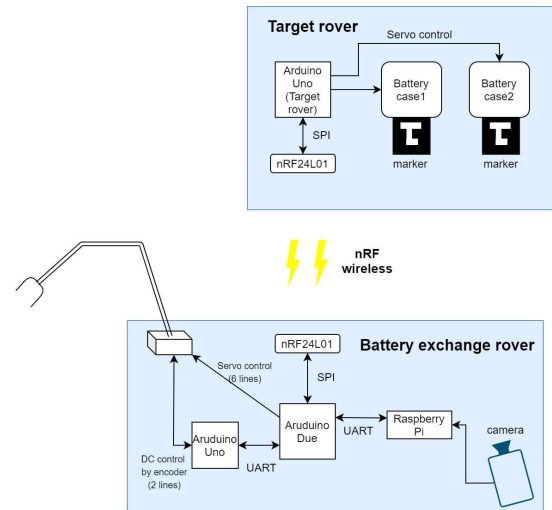


Fig. 41 Rover hardware design

위 그림은 로봇팔의 구성도를 나타낸 그림이고 각각의 구성요소들에 대한 설명은 다음과 같다.

Target rover의 구성품

● nRF24L01

이 무선통신 모듈은 Target rover로부터 준비교체 명령을 받아 이를 Arduino uno에 전달하는 역할을 한다. nRF모듈들은 가격이 저렴하고 안테나 없이도 50m정도까지 안정적인 통신을 진행할 수 있어 임무를 수행하는데 적합하다.

● Arduino uno

Target rover를 제어 한다. nRF로부터 받은 데이터를 처리하여 배터리 케이스에 달려있는 모터에 명령을 보내 임무수행 전 준비를 한다.

Battery exchange rover의 구성품

● Raspberry Pi

카메라로 배터리의 마커를 영상처리하여 UART 통신으로 Arduino Due에 배터리 마운트 좌표 및 각도를 보낸다.

● Arduino due

아두이노 프로세서중 가장 높은 처리속도와 변수 저장공간을 가지고 있다. Raspberry Pi와 Uno, nRF24L01 및 컴퓨터와 통신하여 임무수행을 위한 메인프로그램을 구동한다.

● Arduino uno

로봇 팔의 기저부에 있는 DC모터 2개의 별도 피드백 루프를 구성하고, Calibration값들을 저장하는 역할을 한다.

2.4.2 Algorithm

임무수행 알고리즘은 아래와 같다.

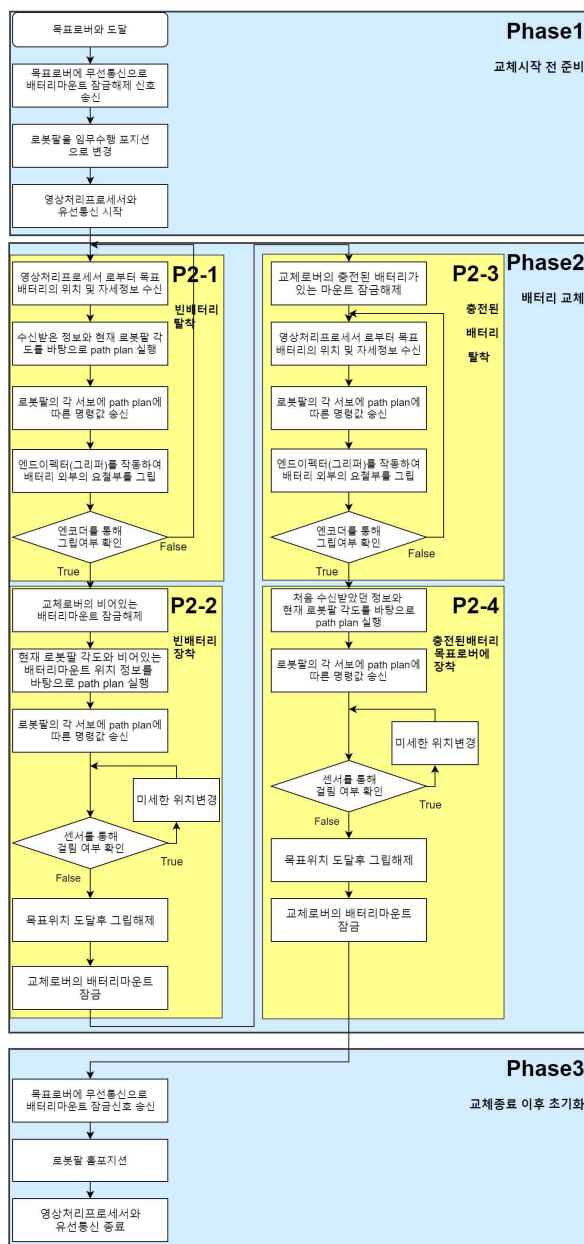


Fig. 42 Mission algorithm

임무수행은 총 3단계의 Phase로 나뉘어 진행된다

다.

Phase1은 교체전 준비를 진행하는 단계이며, 이때 목표로버와 무선통신하여 배터리 마운트의 덮개부분을 열고, 영상처리 프로세서인 라즈베리파이와 통신하여 배터리 마운트의 좌표를 수신한다.

Phase2는 path-plan을 수행하여 배터리 교체작업을 실행하는 단계이다. 이때 배터리 교체작업은 4개의 sub-phase로 나뉘어 진행되며, 각 단계마다 path-plan을 진행한 후 확인작업을 실행하고, 이상이 없을시 다음 sub-phase로 넘어가는 방식이다. 각 sub-phase는 좌표로 이동->하강->그립 또는 그립해제->상승의 작업을 실행하며, 이에 따라 sub-phase당 path-plan의 실행횟수는 3번이다. 이에 따라 Phase2에서 총 12번의 path-plan이 이루어진다.

Phase3는 배터리 교체작업 이후 마무리작업을 진행하는 단계이다. 무선통신을 통해 목표로버의 배터리마운트 덮개를 다시 덮고, 로봇팔을 홈포지션으로 되돌려 보내며, 영상처리 프로세서와도 통신을 종료하는 일련의 과정을 실행하여 로봇팔을 교체임무 시작전의 상황으로 되돌린다.

2.4.3 Software Configuration

임무수행과 이를 보조하기 위한 기타 기능들을 구현하기 위해 두 아두이노 프로세서의 프로그래밍을 진행하였다. 각 프로세서에 구현된 기능은 아래와 같다.

아두이노 듀에(Due)

- 컴퓨터와 UART 및 Bluetooth 통신
- nRF24L01 모듈과 SPI 통신
- 라즈베리파이와 UART 통신
- Uno와 UART 통신
- 캘리브레이션
- DC 또는 Servo모터의 수동조작
- 좌표입력을 통한 이동
- 임무수행

아두이노 우노(Uno)

- Due와 UART 통신
- 2개의 기저부 DC모터 제어

● 캘리브레이션값 EEPROM 저장

이때 듀에는 컴퓨터 및 스마트폰과 UART 또는 Bluetooth 통신을 수행하여 작업자의 명령을 처리할 수 있으며, nRF24L01 모듈과 SPI 통신하여 무선통신을 수행할 수 있다. 또한 Uno와 UART 통신을 통해 각종 필요한 정보들을 교환할 수 있다. 이를 바탕으로, 듀에는 캘리브레이션을 진행하여 미세한 각도오차를 보정할 수 있으며, 작업자에 의하여 각 관절의 각도를 수동으로 제어할 수 있다. 또 로봇팔의 엔드이펙터를 원하는 좌표로 보낼 수 있다. 마지막으로, 해당 기능들을 전부 사용하여 자동 배터리교체임무를 수행할 수 있다.

우노는 UART 통신을 통해 듀에로부터 DC모터 각도값을 받거나 캘리브레이션값들을 받을 수 있다. 이로부터 2개의 DC모터를 제어하거나, EEPROM을 활용하여 캘리브레이션값들을 비휘발성 메모리에 저장한 뒤 듀에가 재가동했을 때 이를 다시 전달해줄 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 우주환경에서 타겟 로버의 배터리를 교체하는 로봇팔 시스템으로서 마커를 이용하여 사물 인식, 거리 및 자세 측정, 경로 생성, 작동하는 시스템이다. 배터리, 영상처리 파트 등이 융합된 시스템에서 본 논문은 로봇팔 설계 및 제작과 실험에 중점을 두고 있다. 임무를 위한 로봇팔은 System engineering 기법인 V-shape diagram을 따라 개발되었다.

향후 과제로서, 일부 조인트에서의 토크 부족과 마찰감소, 로봇팔의 작동 정확성 개선 등이 존재한다. 엔드이펙터의 경우 배터리팩을 잡고 배터리팩의 무게 5.3955N과 로봇팔 작동시의 추가적인 관성력을 견뎌야 한다는 요구조건은 독립적으로 만족하였다. 또한 조인트 서보의 토크를 고려한 엔드이펙터 총 질량제한(200g 이하)을 만족시켰다. 하지만 로봇팔의 작동 정확성을 검증하기 위한 최종 결합 후 시험은 진행하지 못하였다. 엔드이펙터가 영상처리팀에서 제공한 배터리팩 위치에 정확히 도달할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다. 만약 해당 위치에 정확히 도달하였

는데도 그림과정에 문제가 있다면 패스플랜의 수정 또는 영상처리의 정확성 개선이 요구된다. 또한 우리가 만든 로봇 팔은 각각의 서보 모터 내의 피드백 루프 시스템을 신뢰하여 로봇 팔 전체의 움직임에 대해서는 피드 백 시스템이 없다. 이러한 방법은 미션 수행이 정확하게 이루어지고 있는지에 대한 신뢰성이 떨어진다. 이에 따라 로봇 팔 자체가 배터리를 정확하게 집었는지 확인할 수 있는 별도의 센서를 추가하여 미션 수행에 대한 신뢰성을 높일 필요가 있다.

또한, 비록 사용된 액추에이터가 모두 12V 이하라는 점에서 제한조건을 만족시키기는 하였으나, 결과적으로 토크부족이 발생하였다. 12V 이하의 액추에이터 중 조건을 만족하는 액추에이터의 폭이 넓지 않아 대체에 어려움이 있었으며, 교환 배터리만으로 전력을 충당하기에는 요구 사항이 높았던 것으로 분석된다. 따라서 제한조건 외의 환경에서 추가적인 전력이 공급이 요구된다.

배터리 자동교체 시스템은 우주환경 뿐만 아니라 다양한 산업군에서 적용될 수 있다. 배터리가 아니라 부품/장비라고 가정한다면 스마트 플랜트 라인이나 복잡한 환경에서 어시스턴트 의료 로봇 등 활용될 분야는 무궁무진하다. 앞서 언급한 향후 과제를 해결함으로써 이처럼 다양하고 복잡한 환경속에서 다양한 임무를 수행해낼 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국항공대학교 캡스톤 디자인 과제의 일환으로 진행된 연구이며, 협력해 주신 모든 분들께 감사드립니다. 특히 지도교수이며, 함께 배우며, 방향을 제시해 주신 장대성 교수님께 감사를 표합니다.

참고문헌 (References)

- (1) Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, 2013, "Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th Ed.", McGraw-Hill
- (2) Saeed B. Niku, 2011, "Introduction to Robotics, 2nd Ed." Wiley.