

델타로봇을 이용한 미들마일 통합 시스템

Middle Mile System Using Delta Robots

정 성 조(SeongJo Jung), 안 승 찬(SeungChan Ahn), 이 승 호(SeungHo Lee),
권 유 나(Yuna Kwon), 김 규 빈(GyuBin Kim)

School of Mechanical Engineering
Korea University of Technology and Education
{2020120148, schahn131, hjm00105, tsp0220, kyilife2021}@koreatech.ac.kr

요 약

이 작품은 아날로그 방식으로 처리되던 미들마일 영역의 업무를 디지털화하여 효율성과 정밀도를 높이는 것을 목표로 한다. 미들마일은 물류산업에서 사용되는 용어로, 제조사에서 생산된 상품이 이동하기 시작하는 퍼스트 마일과 택배사가 허브에서 소비자에게 택배를 운송하는 라스트 마일의 중간 단계를 의미한다. 현재 미들마일 단계에서는 화주가 주선자를 통해 차주와 연결된다. 이 과정에서 주선자의 개입으로 추가 비용과 시간이 소요된다. 또한, 적재 위치를 고려하지 않은 연결로 인해 추가 작업이 발생한다. 이는 하단에 적재된 화물의 차주가 먼저 도착한 경우, 상단의 화물을 다른 위치로 옮겨두고 하단의 화물을 적재하는 작업으로, 불필요한 인력과 시간을 필요로 하게된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 화물의 적재와 동시에 화주와 차주를 연결 시키는 통합 시스템을 개발하였다. 인간 대신 로봇이 분류와 적재 작업을 진행하여 보다 높은 효율성과 정밀도를 갖도록 하였고, 기존에 아날로그 방식으로 처리되던 데이터들을 디지털화 하여 체계적인 물류관리 시스템을 구축 하고자 하였다.

키워드 : 미들마일, 물류, 시스템, 디지털화, 델타로봇, UI,

Abstract

This project aims to digitize the tasks in the middle mile, which have been traditionally handled in an analog manner, to enhance efficiency and precision. The middle mile, a term used in the logistics industry, refers to the intermediate stage between the first mile, where products are moved from the manufacturer to the first logistics point, and the last mile, where delivery companies transport packages from the hub to the consumer. Currently, in the middle mile stage, shippers connect with drivers through intermediaries. This process incurs additional costs and time due to the involvement of intermediaries, and leads to extra work due to connections that do not consider the loading position. For instance, if the driver with the cargo loaded at the bottom arrives first, the cargo on top needs to be relocated to access the bottom cargo, resulting in unnecessary labor and time. To address these issues, an integrated system that connects shippers and drivers simultaneously with cargo loading has been developed. Robots, instead of humans, handle sorting and loading tasks to achieve higher efficiency and precision. Additionally, data previously processed in an analog manner has been digitized to establish a systematic logistics management system.

Keywords : Middle Mile, Logistics, System, Digital Transformation, Delta Robot, UI

1. 서론

최근 전자상거래와 물류산업의 대폭적인 성장으로 인해 효율적인 물류 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 물류산업 내에서 미들마일(middle mile)은 퍼스트 마일(first mile)과 라스트 마일(last mile) 사이의 중요한 과정이다. 퍼스트 마일은 제품이 제조사에서 출발하여 첫 번째 물류 단계로 이동하는 것을 의미하며, 라스트 마일은 최종적으로 택배사가 허브에서 소비자에게 상품을 전달하는 마지막 단계이다. 이러한 두 공정 사이에 위치한 미들마일은 국내 물류산업에서 상당한 규모를 차지하고 있으며, 다른 단계에 비해 약 6배 이상의 시장 규모를 가지고 있음에도 불구하고 여전히 많은 작업들이 아날로그 방식으로 운영되고 있다 [1]

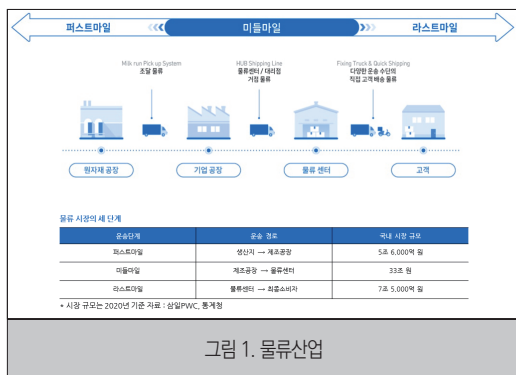


그림 1. 물류산업

이러한 아날로그 방식은 물류 과정 전반에 걸쳐 다양한 문제를 초래한다. 예를 들어 화물의 배치, 위치 추적, 운송 서류 처리, 차주와의 커뮤니케이션 등은 모두 수작업으로 처리되며, 이는 효율성 저하와 불필요한 비용 증가를 초래한다. 특히, 화주와 차주를 연결하는 과정에서 많은 문제가 발생한다. 현재 화주는 물류 주선자를 통해 차주와 연결되는데, 이 과정에서 주선자가 중간 역할을 수행하며 추가 비용과 시간이 소요된다. 전화, 팩스, 이메일 등의 의사소통 방식으로 정보 전달이 지연되고, 차주가 도착하는 순서에 따라 상품의 적재 위치를 고려하지 않고 작업이 진행되어 비효율적인 적재가 발생한다. 이는 하단에 적재된 상품의 차주가 먼저 도착한 경우, 상

단의 화물을 임시로 다른 위치에 옮겨두고 하단의 화물을 적재 해야되는 불편을 초래하며, 추가 작업으로 인력과 시간이 낭비된다. 또한, 화물의 위치 추적과 운송 서류 처리가 아날로그 방식으로 이루어져 실시간 정보 접근이 어렵고 오류 발생 가능성이 높다. 이러한 문제들은 전체 물류 과정의 효율성을 저하시켜 비용을 증가시키는 요인이 된다. 따라서 화주와 차주 간의 연결 과정을 디지털 플랫폼을 통해 자동화하고, 화물의 적재 위치 정보를 실시간으로 관리하여 효율적인 물류 관리를 도입하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해, 화주와 차주 간의 연결 과정을 디지털 플랫폼을 통해 자동화하고, 상품의 적재 위치 정보를 이용해 효율적인 물류 관리를 할 수 있는 미들마일 통합 시스템을 설계하였다. 이를 통해 불필요한 중간 과정을 없애고, 물류 과정 전반의 효율성을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 시스템 구성과 설계 내용

본 연구에서 개발한 시스템은 크게 델타로봇, UI, 통신으로 나눌 수 있으며 그림2와 같은 흐름도를 가진다. 먼저, UI에서 선택한 옵션과 비전시스템에서 인식한 QR코드 정보를 바탕으로 델타로봇이 화물을 분류하고 적재한다. 그리고 해당 작업이 진행되는 동시에 화물의 정보들이 UI에 실시간으로 전송된다. 이 정보는 화물이 적재된 위치, 화물의 고유번호, 차주의 정보 등이 이에 해당되며, 분류된 위치대로 UI에 나타나게 된다. 작업이 종료되면, 상단에 적재된 화물부터 순차적으로 해당 화물의 위치와 차주가 도착할 시간이 담긴 메일이 자동으로 차주에게 전송된다. 이러한 흐름을 따라 시스템이 운영된다.

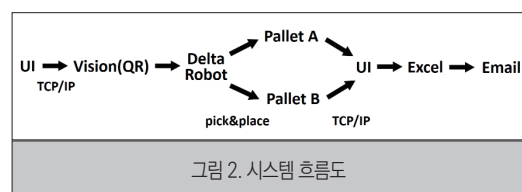


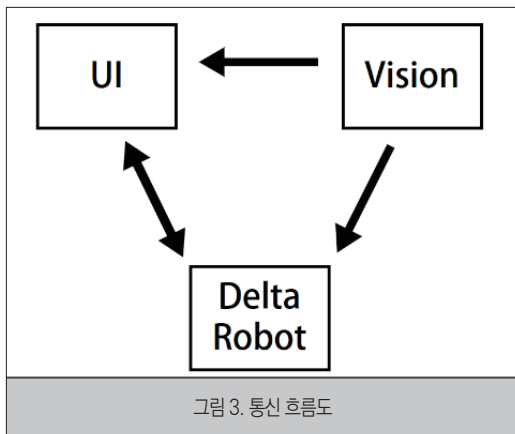
그림 2. 시스템 흐름도

3. S/W 구성과 설계 내용

3.1. 통신 시스템

물류와 관련된 실제 산업현장에서는 정확한 정보 전달이 필수적이다. 또한 작업의 특성상 UI를 위치 제약 없이 확인할 수 있어야 한다고 판단하여, 안정성이 높은 무선 통신 방식인 TCP/IP를 선택하였다. 해당 통신방법을 이용하여, Delta Robot과 Vision을 제어하는 메인 PC는 UI를 실행시킨 PC와 실시간으로 통신하게 된다. 이때 송수신 되는 데이터들은 다음과 같다.

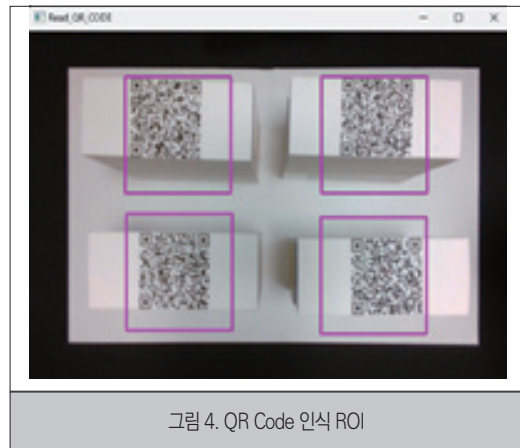
Vision 시스템은 QR코드의 정보와 인식한 시간을 UI로 전송한다. 동시에, Delta Robot의 End Effector가 위치할 좌표값을 Delta Robot에 전달한다. Delta Robot이 올바른 위치로 이동하면, 화물이 위치한 곳의 정보와 동작 완료 시간을 UI로 전송한다. UI는 사용자가 선택한 분류 기준에 따른 정보를 메인 PC로 전송하고, 분류 작업이 완료되었다는 알림을 보낸다. 분류 작업 완료 정보가 전송되면, 수집된 데이터는 엑셀 파일로 생성되며, 차주들에게 자동으로 메일이 전송된다.



3.2. Vision System

미들마일의 디지털화를 위해서 가장 중요한 것은 화물의 정보를 디지털화 하는 것이다. 이를 위해 화물의 정보가 담긴 QR 코드를 화물 상단에 부착하여

이 코드를 인식하여 모든 데이터를 관리 할 수 있도록 했다. 이때 Open CV를 기반으로 보다 안정적인 QR 코드 인식 환경을 만들었다. 또한 델타로봇이 화물을 Pick 할때 End Effector가 위치할 좌표 값을 얻어내었다. 설정한 ROI 영역에서 인식된 화물의 중심점을 구했고, 이는 x,y 좌표가 되었다. 이어서 각 층마다 카메라에 인식되는 화물의 가장 긴변의 길이가 상이함을 이용하여 화물이 위치한 층수를 구해 z 좌표를 얻어내었다.



3.3. UI(User Interface)

본 연구에서 개발한 시스템은 기존의 수동적 작업 환경을 능동적이고 디지털화 하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 Python의 다양한 유용한 모듈을 사용할 수 있는 PyQt5를 이용하여 시스템의 UI를 개발하였다. 그림 5는 구현한 UI환경이다. UI는 비전을 통해 인식된 정보들이 분류 되어 나타나게 된다. 작업이 완료된 시간, 적재 위치 같은 작업 이력들을 작업자에게 제공한다. 그림 5 우측 상단에 보면 Option1, Option2, Option3를 확인 할 수 있다. 이는 작업 상황에 맞게 선택이 가능하며, 선택한 내용으로 분류 Delta Robot이 분류 작업을 하게 된다. 각 Option은 작업 상황에 맞게 설정이 가능하기 때문에 다양한 제조사 분류 적재 작업에 적용 가능할 것이다.



그림 5. UI

UI에 사용된 기술은 크게 토글기능을 사용하기 위한 Layout 겹치기와 QGridLayout이 있다. 많은 양의 물류 정보를 나타내기 위해 보다 체계적인 Layout 설정이 필요했고, QGridLayout은 전체적인 Layout의 위치와 간격을 특정하기에 유용한 기능이기에 이 시스템에 사용되었다. 다음으로 토글기능을 구현할 수 없는 PyQt5에서 기능이 구현된 것처럼 시각적 착각을 일으키도록 Layout 겹치기를 구현했다. 두 개의 Label과 QPushButton 위젯을 같은 위치에 설정해, 클릭할 때마다 QPixmap의 이미지가 바뀌게 된다.

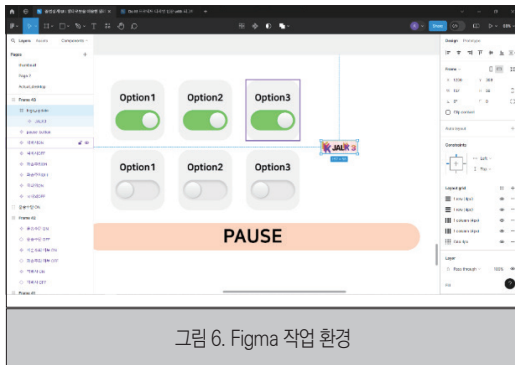


그림 6. Figma 작업 환경

3.4. 정보의 디지털화

그림 7을 통해 UI와 엑셀에 각 화물에 대한 데이터가 잘 표시됨을 확인할 수 있다. 해당 데이터들은 기존에 아날로그 방식으로 진행되던 작업을 디지털화할 수 있는 토대를 마련해준다. 화물의 위치를 추적하고 관리할 때 UI가 사용될 수 있으며, 이를 통해 생성된 엑셀 파일은 각 차주들에게 전송될 자동 메

일의 핵심 자료가 된다. 그림 8은 실제로 전송된 메일이다.

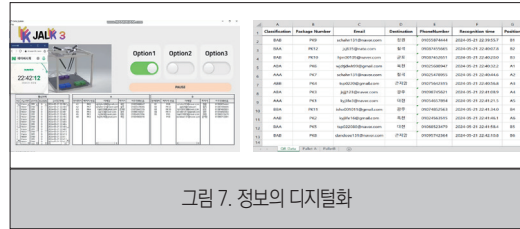


그림 7. 정보의 디지털화

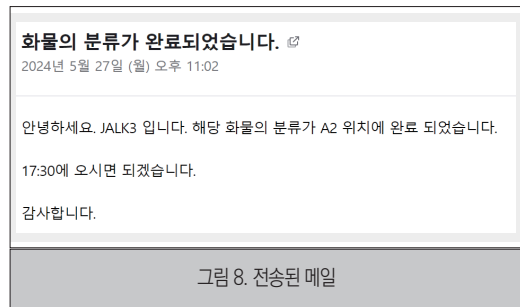


그림 8. 전송된 메일

4. H/W 구성과 설계 내용

4.1. 델타로봇 설계

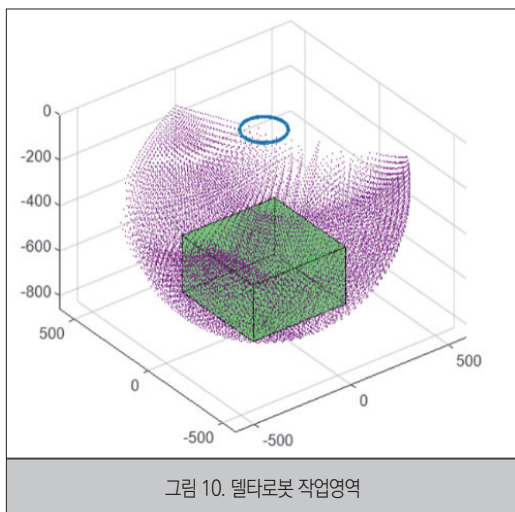
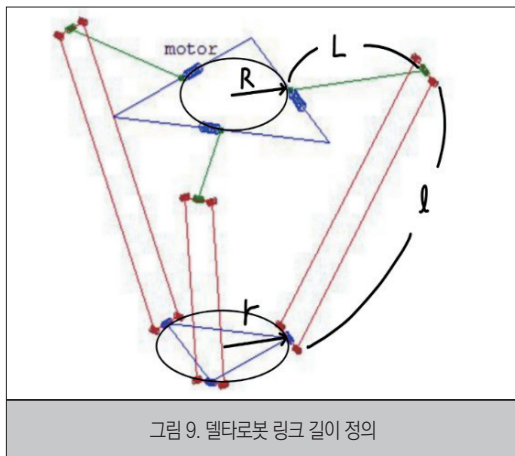
4.1.1 Kinematic 설계

우리가 구현하고자 하는 시스템은 높은 정밀도와 속도를 기반으로 한 물품 분류 및 적재 작업을 목표로 한다. 이를 위해 실제 산업 현장에서 널리 사용되는 델타 로봇을 우리 상황에 맞게 제작하기로 결정하였다. 델타 로봇은 병렬 로봇(Parallel Robot)의 한 종류로, 직렬 로봇(Serial Robot)과 비교하여 동일한 모터 수 대비 강성, 적재 용량, 정확성 면에서 뛰어난 성능을 가진다는 특징이 있다 [2,3].

델타 로봇을 최적의 성능으로 설계하기 위해 Kinematics 적 접근을 활용하여, End Effector의 위치에 따른 모터의 각도 값을 산출하였다. 델타 로봇 설계에 필수적인 길이값은 그림 9에 나타난 'Base radius(R)', 'Bicep length(L)', 'Forearm length(l)', 'Platform length(r)'이다. Base radius(R)와 Platform length(r)는 작을수록 가속 성능과 하중에 대한 안정성이 향상되므로, 모터

와 솔레노이드 밸브 등의 크기를 고려하여 최소 길이값으로 설정하였다. Base radius(R)는 100mm, Platform length(r)는 40mm로 선정하였다. Bicep length(L)와 Forearm length(l)는 길이 비율로 정의되며, 최대 반경을 갖는 비율은 $1.5 \cdot L$ 이다. 본 연구에서는 Z 축 높이를 고려하여 약 2.3배의 비율을 적용하였다.

결론적으로, Base radius(R) : 100mm, Bicep length(L) : 260mm, Forearm length(l) : 600mm, Platform length(r) : 40mm로 설정하였으며, MATLAB을 이용한 반복 계산을 통해 필요 작업 영역인 '480 * 480 * 250' 을 충족할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 설계의 타당성과 구현 가능성을 검증할 수 있었다. 이 결과는 그림 10에 시각적으로 나타내었다.



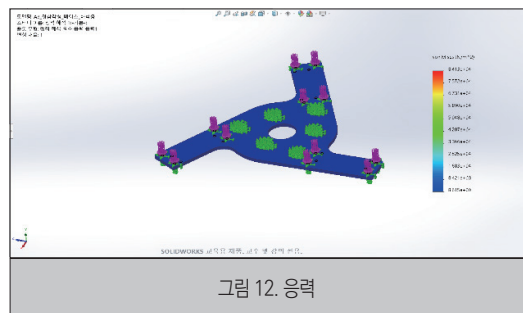
4.1.2 델타로봇 모델링

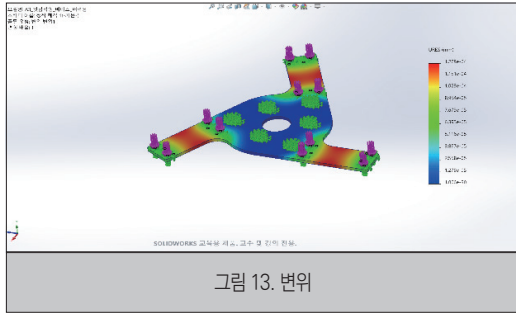
델타로봇 제작을 위해 시중에서 구할 수 없는 연결부와 베이스를 제작하고 충돌과 작업반경 확인, 구조해석을 위한 모델링을 진행하였다. 또한, 시중에서 구매한 모터, 볼조인트, 탄소봉(링크)과 같은 부품도 델타로봇 전체 모델링을 위해 단순화하여 구현하였다. 이렇게 모델링한 파트는 총 22개이고 그림 11에 최종 형태를 나타내었다.



4.1.3 델타로봇 구조해석

델타로봇의 안정적인 구동과 안전성을 위해 가장 많은 하중이 가해지는 로봇의 윗삼각형 베이스 파트에 대한 구조해석을 진행했다. 해석은 Solidworks를 이용하였다. 로봇의 하중을 1kg, 물체의 하중을 200g으로 판단하였으며, 총 중량을 2kg으로 산정했다.





윗삼각형 베이스의 재질은 SUS304로 선정하였으며, 모터연결부, 프로파일과 체결되어 볼트로 고정되는 부분을 경계조건으로 부여하였다. 따라서 이에 관한 결과를 그림12와 그림13에 나타내었으며, 각각 응력과 변위를 나타낸다. 응력의 최댓값은 8kPa 이고 최대 변위는 로 나타났다. 이에 따라 결과값이 허용범위 내에 있는 것을 파악하였고 SUS304로 윗삼각형 베이스의 제작을 진행하였다.

4.2. 그리퍼 선정

본 연구에서는 진공펌프를 이용한 흡착 그리퍼를 사용하였다. 흡착 그리퍼는 다양한 크기의 물체를 취급할 수 있으며, 빠른 작업이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 화물을 Pick 할때, 그리퍼의 크기를 고려하지 않아도 되어 공간을 효율적으로 사용할 수 있다. 따라서 다양한 제품에 유연하게 대응할 수 있으며, 물체를 빠르게 픽하고 이동할 수 있어 작업 속도를 향상시켜 전체 물류 시스템의 효율성을 극대화할 수 있다.

흡착 그리퍼는 진공펌프와 흡착 패드로 구성되어 있으며, 보다 높은 페이로드를 처리할 수 있게 두 개의 흡착 패드를 사용하였다. 또한 그리퍼의 제어를 위해 3포트 솔레노이드 밸브 2개를 연결하여 이용하였다. 디지털신호를 제어하기 위해 릴레이모듈을 사용하였으며, 이를 통해 튜브의 진공을 방지하고 빠른 속도로 반응할 수 있도록 설계하였다.

4.3. 볼조인트 설계

델타로봇의 장점은 높은 속도, 가속도 안정성과 고성 정확성이지만 단점으로는 병렬 구조로 인해 제한

된 작업영역을 갖는 점이다. 설계된 델타로봇의 작업 영역은 Kinematics적 해석을 통해 최대 반경을 확인했다. 하지만 델타로봇의 실제 작업영역은 링크간의 접촉, 볼조인트의 요동각도 제한 등의 이유로 이론 반경보다 작은 값은 반경을 갖게 된다. 이와 같은 각도 제한의 문제를 해결하기 위해 실제 작업 영역 반경을 높이기 위해 볼조인트 소켓을 직접 설계하여 사용하였다. 기존 볼조인트 소켓은 볼스터드와 일체형으로 약 50°의 요동각을 갖기 때문에 작업영역은 더 제한되게 된다. 볼조인트 소켓은 그림14 같이 설계되었으며, 설계된 소켓의 요동각은 약 150°이다.

일체형 볼조인트 소켓과는 다르게 볼조인트를 완전히 고정하지 못하게 된다. 이러한 문제를 인장스프링을 볼조인트 소켓끼리 마주 보게 연결하여 스프링의 복원력에 의해 볼스터드가 소켓으로부터 탈락하는 것을 방지하여 고정할 수 있게 된다. 따라 기존 일체형 볼조인트를 사용하는 방식에 상대적으로 약 3배의 요동각을 가지며, 보다 넓은 작업영역을 갖는다.

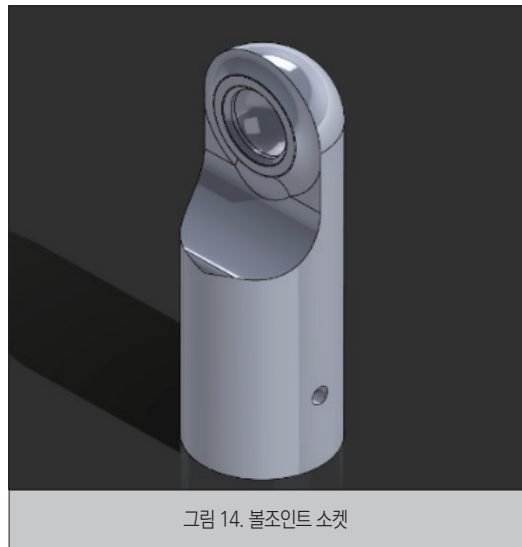


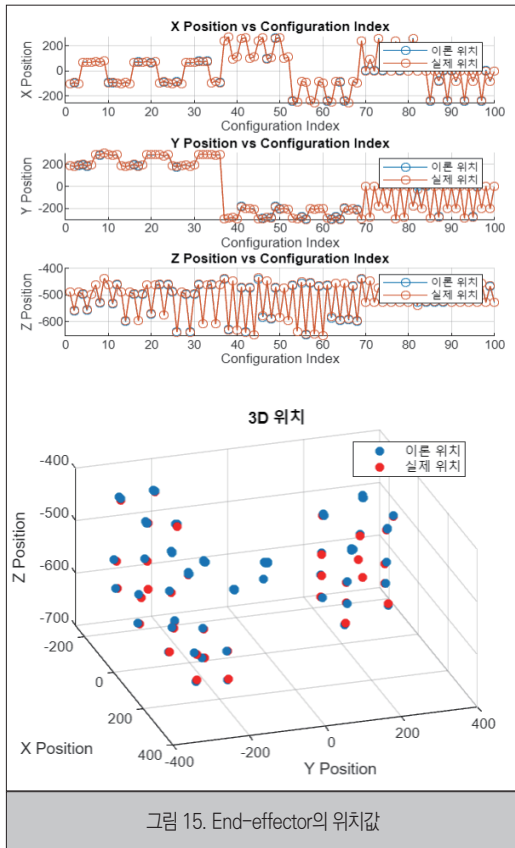
그림 14. 볼조인트 소켓

5. 성능평가

5.1. 위치오차

그림15 는 3개의 모터의 각도 값을 Kinematics 를 통해 계산하여 End-effector의 위치값들을 도

시한 것이다. 파란색은 이론 모터 각도 값을 통해 계산된 위치값을, 빨간색은 실제 모터 각도 값을 통해 계산된 위치 값을 나타낸다. 각 위치 오차율은 Error Rate(x):2.3%, Error Rate(y):1.1%, Error Rate(z):0.3%이다. 각 오차율은 2.5% 미만의 위치 오차율을 보여주며 초기 설정한 위치 오차율 범위에 부합한 값을 가진다. 실제 로봇을 통해 Pick and Place 작업을 진행하면서 문제없이 작업을 완료하는 것을 확인하였다.



6. 결론

본 연구를 통해 그림16과 같이 시스템을 제작하여 미들마일 영역에서 진행되던 아날로그 방식의 작업을 디지털화하여 효율성과 정밀도를 높이는 데 성공하였다. Vision 시스템, UI, Delta 로봇을 TCP/IP 통신을 이용해 실시간으로 연결하여 화물의 데이터를 정확하고 신속하게 획득할 수 있었다.

이를 통해 화물의 배치, 위치 추적, 차주와의 커뮤니케이션 등의 작업을 디지털화하여 자동화된 물류 관리 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 기존의 비효율적이고 오류 가능성이 높은 아날로그 방식을 디지털화함으로써 물류 과정 전반의 효율성과 정확성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 시스템의 안정성과 확장성을 더욱 높이기 위해 다양한 산업 현장에서의 실증 연구를 진행하고, 새로운 기술을 지속적으로 도입하여 시스템을 고도화할 것이다.



참고 문헌

- [1] Effect of Link Length Ratio on the Workspace of a Delta Robot Swapnil S. Jogal, K. Jayarajan, Aqleem Siddiqui
- [2] Delta Robot Kinematics 3D printing-building by learning X. Chen University of Washington
- [3] The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions Robert L. Williams II, Ph.D., williar4@ohio.edu Mechanical Engineering, Ohio University, October 2016 Clavel's Delta Robot 1 is arguably the most successful commercial parallel robot to date. The le