



## 영상처리기술을 활용한 소형 물체 정렬 델타로봇에 관한 연구

정수진<sup>a</sup>, 강해원<sup>a</sup>, 제형구<sup>a</sup>, 이승우<sup>b</sup>, 심재홍<sup>a</sup>, 김기현<sup>a</sup>, 김효영<sup>a,\*</sup>

### Research on Delta Robots for Miniature Object Sorting Using Image Processing Technology

Sujin Jeong<sup>a</sup>, Haewon Kang<sup>a</sup>, Hyeong-gu Je<sup>a</sup>, Seung-woo Lee<sup>b</sup>,  
Jaehong Shim<sup>a</sup>, Kihyun Kim<sup>a</sup>, Hyo-young Kim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea

<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Tech University of Korea

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 30 September 2024  
Revised 17 October 2024  
Accepted 22 October 2024

##### Keywords:

Delta-Robot  
Precision loading  
Image processing  
Multi-Body dynamics analysis

#### ABSTRACT

This study explores the use of delta robots in industrial automation, focusing on high-speed sorting and precision loading tasks. Characterized by three parallel axes and a central joint, delta robots provide rapid movement and precise positioning capabilities, making them highly demanded across various industrial settings. This study enhances robot performance through advancements in image processing and control algorithms by integrating these technologies to ensure precise operation and efficiency. A simplified environment employs a vision system to accurately identify the positions of stationary objects. The end-effector of the robot is optimized for precise placement through advanced positional control. A multi-body dynamics analysis is used to refine design parameters, and a robot with an integrated vision and control system is developed based on a verified, stable delta robot design. This integrated approach is expected to significantly advance the applications of robotics in industrial environments and thereby broaden the potential of automated systems.

## 1. 서론

최근 산업 자동화 분야에서 로봇 기술이 급속도로 발전하면서 제조 공정의 효율성과 생산성이 크게 향상되었다. 병렬형 델타 로봇은 빠른 동작과 높은 정밀도로 부품 조립과 포장 산업 등 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 이 로봇의 구조적 특징은 세 개의 병렬 축이 중앙의 공통 조인트에 연결되어 있어, 높은 속도와 정밀한 위치 결정 능력을 가능하게 한다. 현재, 많은 산업 현장에서 병렬 거동 시스템을 활용하여 소형 물체의 고속 분류 작업을 수행

하고 있다. 델타 로봇은 전통적인 제조업 뿐만 아니라, 사용자 친화적인 인터페이스를 통해 활용 범위를 다양한 산업으로 확장하고 있다. 이 과정에서 로봇의 빠른 동작과 정밀한 작업 수행 능력은 생산 라인의 핵심 요소로 자리 잡았다. 그러나 기존 3축 병렬 로봇 시스템은 복잡한 메커니즘과 자체 무게로 인해 고속 및 고하중 작업의 수행에 한계를 가진다. 이를 극복하기 위한 3축 병렬 로봇에 대한 연구는 기구학적 설계, 위치 정밀도를 위한 영상처리, 제어 알고리즘 개발을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 경량화된 소재의 도입으로 로봇의 무게를 줄이고, 속도와 반응성을 향상시

\* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-0464

E-mail address: kimhy@tukorea.ac.kr (Hyo-young Kim).

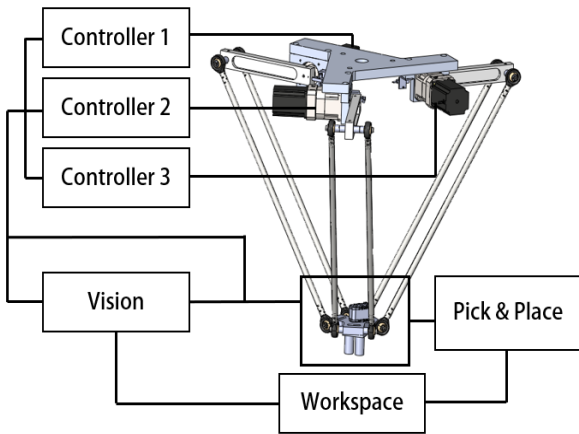


Fig. 1 Schematic diagram of the delta robot system

키며, 운용 비용을 절감하는데 중요성이 부각된다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 실제 작업 환경을 모사하여 간이 컨베이어 벨트를 통해 물체를 이동시키고, 비전 시스템을 활용해 정지한 물체의 위치를 정확히 식별하고 결정한다<sup>[2]</sup>. 이후, 델타 로봇의 말단 장치(end-effector)에 회전 자유도를 추가함으로써, 선택된 물체를 목표 작업 공간에 정밀하게 적재하는 작업을 수행한다<sup>[3]</sup>. 본 시스템의 효율성은 작업 주기 시간 단축과 정밀도에 중점을 두고 있으며, 실험 결과 4 kg의 가반하중을 처리하면서 목표 위치에 1.5초 이내로 이동하고, 정밀도는 3 mm 이내로 유지되었다. 이를 통해 회전 자유도의 추가로 로봇의 기동성이 향상되어, 물체 배치의 정확도가 높아졌으며, 이를 통해 작업 효율성이 극대화되었다. 이를 위해 개발된 델타로봇에는 MBD(multi-body dynamics)<sup>[4]</sup>해석을 적용하여 로봇의 3축 모터의 구동을 분석하고, 로봇의 각 모터 토크가 실제 로봇에 적용될 모터의 사양 내에서 안정적으로 동작할 수 있는지를 평가함으로써 로봇 시스템의 동적 안전성을 도출한다<sup>[5]</sup>. 이 분석을 바탕으로 최적의 설계 파라미터를 도출한다. 최종적으로, 통합된 비전 및 제어 시스템을 갖춘 로봇을 구축하여 최적화 설계 과정을 통해 얻어진 결과를 비교 검증한다. 시스템의 통합 간략도는 Fig. 1과 같다. 로봇의 구동부인 모터는 세 개의 제어기와 연결되어 있으며, 비전 시스템에서 인식한 물체를 기반으로 Pick and place 모션이 실행된다.

## 2. 델타 로봇의 역기구학과 설계 파라미터 분석

### 2.1 델타 로봇의 역기구학 및 설계 파라미터

직렬 로봇(serial robots)과 달리 병렬 로봇(parallel robots)은 정기구학(forward kinematics)에 비해 역기구학(inverse kinematics)이 해를 구하기에 상대적으로 효율적이다. 병렬로봇의 정기구학 해를 구하기 위해 각 링크의 길이와 초기조건을 바탕으로 End-

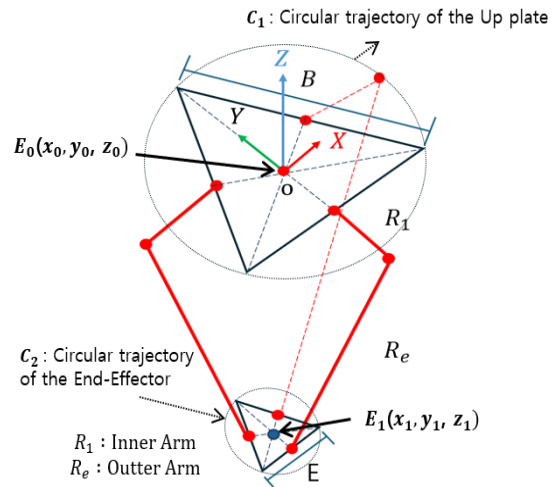


Fig. 2 Inverse kinematics schematic diagram

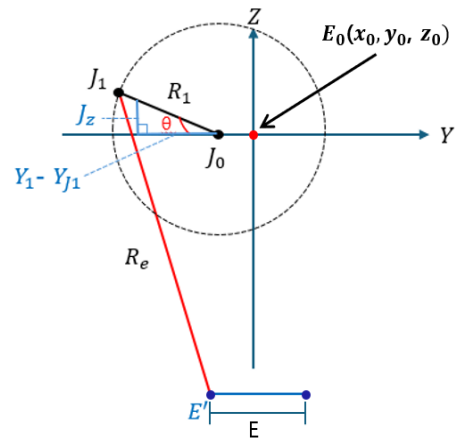


Fig. 3 Inverse kinematics diagram in the Z-Y plane

effector의 위치와 방향을 결정한다. 이는 복잡한 수치해석 기법으로 해를 구해야하기 때문에 역기구학으로 해를 구할 경우 End-effector의 위치와 방향이 주어지면<sup>[6]</sup> 각 링크의 길이 변경을 통해 조인트의 각도를 결정하게 된다. 이를 활용하여 델타로봇의 설계 파라미터를 결정한다. Fig. 2와 Fig. 3은 주요 설계 파라미터를 정의하기 위한 단순화된 모델이다. 이에 대한 설계 파라미터를 실제 설계될 로봇의 모델 플랫폼에 적용한다. End-effector의 끝단과 조인트의 궤적을 원의 방정식으로 변환시켜 역기구학 해를 구할 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\left(Y_{j1} + \frac{B}{2\sqrt{3}}\right)^2 + J_z^2 = R_1^2 \quad (1)$$

$$\left(Y_{j1} - Y_0 + \frac{E}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (J_z - z_0)^2 = Re^2 - x_0^2 \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{J_z}{Y_1 - Y_{J1}} \quad (3)$$

델타로봇의 기구학 파라미터는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 것과 같이,  $R_1$ 은 로봇 링크의 내측 암(inner link),  $R_e$ 는 외측 암(outer link)을 나타낸다.  $J_0$ 은 내측 암인  $R_1$ 이 회전하는 기준점으로 로봇의 회전 축(base joint)에 해당한다.  $J_1$ 은 내측암과 외측 암의 연결 조인트이며,  $J_z$ 는 Z축 방향에서의 관절 좌표(z-axis position)를 나타낸다.  $Y_1 - Y_{J1}$ 은 Y축 상의 거리 차이(difference along y-axis)를 의미하며,  $\theta$ 는 내측 링크의 회전 각(rotation angle of inner link)을 의미한다. 델타 로봇의 Up plate는 삼각형 형태로 구성되어 있으며, 각 변의 모터와 같은 구동축이 중앙에 배치된다. 삼각형 형태의 중앙점은  $E_0(x_0, y_0, z_0)$ 이다. Up Plate의 한 변인 B는 로봇의 각 링크가 연결되는 주요 축 역할을 한다.  $C_1$ 은 Up plate의 삼각형을 외접하는 원의 궤적을 나타내며,  $C_2$ 는 End-effector의 삼각형을 외접하는 원의 궤적을 의미한다. 각 링크는 Up plate의 꼭짓점에서 하부 링크로 연결되며, 이로 인해 로봇의 각 구동축이 독립적으로 움직일 수 있는 자유도를 생성한다. E는 로봇의 End-effector의 한 변으로, Up plate로부터 내측 암, 외측 암을 통해 연결된다. End-effector의 중앙점은  $E_1(x_1, y_1, z_1)$ 이며,  $E'$ 는 외측 암을 연결하여 주는 End-effector의 한 변인 E의 중심을 나타낸다. 3축 병렬 로봇의 역기구학 해를 구하기 위해 End-effector와  $J_1$ 의 궤적을 원의 방정식으로 적용한다. 내측 암  $R_1$ 의 위치 궤적을 기반으로 한 원의 방정식 (1)식과 외측 암  $R_e$ 의 위치 궤적을 기반으로 한 원의 방정식 (2)식을 연립하여  $J_1$ 에 의해서 동일한 좌표인  $Y_{J1}$ 과  $J_z$ 를 도출한다. 도출된  $Y_{J1}$ 과  $J_z$ 을 (3)식에 적용하여 도출된 식의 비율을 통해 최종적으로 모터의 각도  $\theta$ 를 도출한다. 3축 델타로봇은 Up plate로부터 유니버설 조인트로 연결되어 링크 비율(link ratio)에 따라 성능이 달라진다<sup>[8]</sup>. 작업 공간 내에서 관절의 최대각도와 허용각도를 고려한다. 설계인자는 내측 암과 외측 암의 길이, 베이스와 End-effector의 반지름(내접 원)이다.

목표 워크스페이스는 400×400×150 mm로 간섭을 피하기 위한 유니버설 조인트의 허용각도는 65도로 제한한다. 역기구학 식을 통해 목표 작업 공간(workspace)을 충족하기 위한 설계 파라미터는 Table 1으로 결정하였다.

## 2.2 링크 길이 비율에 따른 작업 공간 선정

델타 로봇의 링크 길이 비율은 내측 암/(외측 암+내측 암)으로 결정된다. 내측 암과 외측 암의 합은 810 mm로 고정하여 비율을

각각 0.25, 0.35, 0.45, 0.5에 대하여 최하단을 기준으로 최초로 만족한 작업 공간의 윗면의 높이부터 (200 mm, 200 mm)에서 (-200 mm, -200 mm)으로 이동할 때를 기준으로 결정되었다. 비율이 0.25일 때 내측 암의 길이가 외측암보다 상대적으로 짧기 때문에, End-effector가 도달할 수 있는 최대 높이는 제한적이다. 그러나 작업 공간의 폭은 넓어지며, 스텝각 당 내측 암과 외측 암의 접점의 변위는 비교적 작기 때문에 위치 정밀도가 높아진다. 비율 0.35의 경우 내측 암의 길이가 길어져 End-effector가 도달할 수 있는 최대 높이가 증가하기 때문에 작업 가능 높이가 넓어지는 동시에 작업 공간의 폭은 좁아진다. 스텝각 당 내측 암과 외측 암의 접점 변위 증가로 위치 정밀도 또한 낮아진다. 비율 0.45의 경우 내측 암의 길이가 길어지면서 높이는 높아지지만, 작업 공간의 폭은 더 좁아진다. 스텝각 당 내측 암과 외측 암의 접점 변위는 더욱 커지기 때문에 정밀도는 감소한다. 마지막으로 비율 0.5는 내측 암과 외측 암의 길이가 동일하기 때문에, End-effector가 도달할 수 있는 최대 높이는 가장 높지만, 작업 공간 폭은 가장 좁아진다. 또한 스텝각 당 내측 암과 외측 암의 접점 변위가 커지는 만큼 위치 정밀도가 가장 낮아진다. 결론적으로 비율이 증가할수록 End-effector가 도달할 수 있는 최대 높이는 증가하지만, 폭이 다소 좁

Table 1 Design parameters

Parameter	Value
Up plate (radius of $C_1$ )	150 mm
End-effector (radius of $C_2$ )	50 mm
Medial arm ( $R_1$ )	210 mm
Lateral arm ( $R_e$ )	600 mm

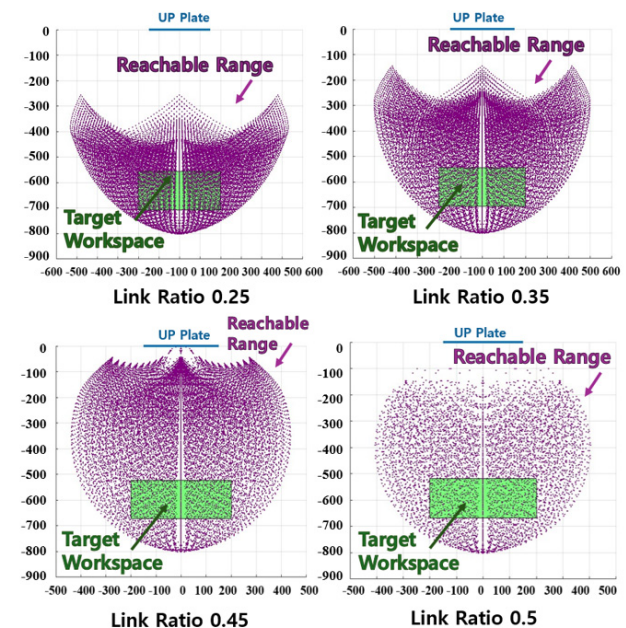


Fig. 4 Workspace according to link ratio

아지고 스텝각 당 내측 압과 외측 압의 변위가 커져 위치 정밀도는 낮아지는 경향을 보인다. Fig. 4는 내측 압과 외측 압의 비율을 각각 0.25, 0.35, 0.45, 0.5로 설정하여, 델타 로봇의 작업 공간을 MATLAB을 활용해 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 각 그래프는 링크 비율에 따른 로봇 작업 공간의 변화를 시각적으로 나타낸다. Reachable range는 링크 비율에 따른 델타 로봇의 End-effector가 도달 가능한 범위이다. Target workspace는 목표로 하는 작업 공간의 범위를 나타낸다. 작업 공간의 분포와 설계 요소의 정밀도를 종합적으로 고려한 결과, 최적의 비율은 0.25로 결정되었으며, 이 비율을 바탕으로 최종 설계 인자를 산출하였다. 이러한 설계는 Table 1에 제시된 바와 같이 설계 조건과 성능 요구 사항을 충족시킨다. 각 비율에 대해 End-effector가 도달할 수 있는 최대 높이, 작업 공간의 폭, 그리고 스텝당 내측 압과 외측 압의 점점 변위를 분석하였다.

### 2.3 모터 부하 시뮬레이션

설계 파라미터가 적용된 로봇의 모델링을 기반으로, 실제 구동 시 델타로봇의 안전성을 검증하기 위한 시뮬레이션을 진행한다. 델타로봇의 End-effector가 목표 작업공간으로 이동할 때를 모션 조건으로 선정하였다. 모터 부하 시뮬레이션을 위해 상용 유한요소 해석(FEA) 소프트웨어인 ANSYS社의 Motion 프로그램이 사용되었다. Fig. 5와 같이 설계된 로봇의 구동축과 연결된 내측 압과 외측 압 그리고 End-effector로 구성된 모델링을 시뮬레이션한다. 로봇의 말단부는 Mass point를 적용하여 최종 목표하는 적재 물품의 무게를 고려하여 4 kg를 부여한다. Fig. 4에 제시된 바와 같이, 본 시뮬레이션에서는 로봇의 End-effector가 작업 공간 내에서 직선 궤도를 따라 움직이도록 설계되었다. 목표 직선 궤도를 End-effector의 중심점이(200 mm, 200 mm)에서 (-200 mm, -200 mm)까지 4초 동안 직선 경로로 이동하도록 설정하였다. 이동 경로는 X-Y 평면에 맞춰져 있으며 Z축의 위치는 고정된다.

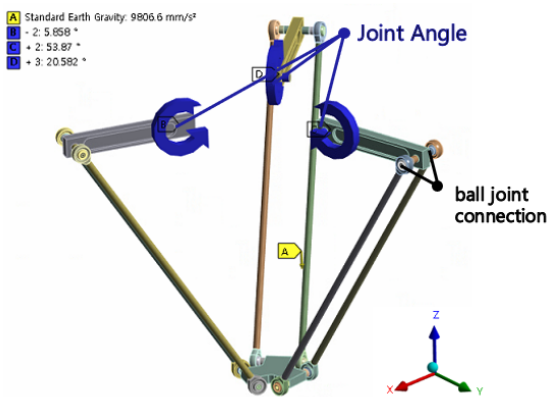


Fig. 5 Boundary conditions for the delta robot

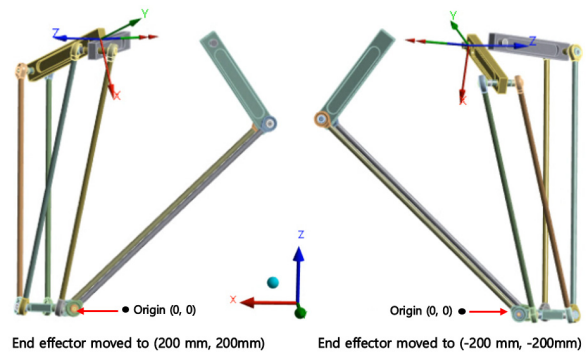


Fig. 6 Representation of the delta robot's motion in the X-Y plane

End-effector의 속도는 X축을 따라 일정하게 -100 mm/s로 이동할 수 있도록 설정되었으며, 이로 인해 X축을 따라 일정한 속도로 움직이는 동안 Y축 위치는 이동 경로 전체에서 200 mm로 고정되어 유지된다. 이 설정은 End-effector가 목표 경로를 따라 이동할 때 일관된 모션을 유지하기 위함이다. 이를 통해 경로를 따라 이동하는 동안 발생할 수 있는 속도 변화 및 위치 변경을 최소화하고, 정확한 제어를 가능하도록 하는 모션을 형성할 수 있다. Fig. 6은 X-Y 평면에서 End-effector가 목표 작업 공간을 이동할 때 모션을 나타낸다. 왼쪽 모션은 End-effector가 X축과 Y축 방향으로 각각 원점 (0,0)으로부터 (200 mm, 200 mm) 이동한 상태를 보여주며, 오른쪽 모션은 (-200 mm, -200 mm)로 이동한 상태를 보여준다. 각 이동 경로에 따라 델타 로봇의 구조적 변화를 시각적으로 확인하여 각각의 위치에서 로봇의 기구학적 특성과 안정성을 분석할 수 있다. 이 과정에서 각 3축의 모터 토크는 End-effector의 위치와 속도에 따라 변하게 되며, 이러한 변화를 나타낸 그래프는 Fig. 7에 제시되어 있다. 이 그래프는 각 X,Y,Z 축 모터의 토크 변화를 나타내며, 설정된 조건 하에서 모터 작동을 표시한다.

### 2.4 시뮬레이션 결과 분석

모터 부하 시뮬레이션 결과인 Fig. 10에 따르면, 3축 델타 로봇의 End-effector를 목표된 모션 경로로 구동하는 경우, 구동 모터에서 발생하는 최대 토크가 5.1 N·m로 측정되었다. End-effector에 4 kg의 부하를 부착하였을 때, 로봇의 모션은 안정적으로 유지될 것으로 예측된다. 실제로 4 kg의 부하는 Pick and place 대상인 물체와 End-effector 끝단에 적용되는 회전 자유도가 탑재된 스텝 모터의 무게를 고려하였다. 이러한 예측에 기반하여, 실제 제작 예정인 델타 로봇은 최대 토크 24 N·m 제공할 수 있도록 10:1의 감속비를 갖는 감속기가 탑재된 스텝모터를 선정하였다. 목표 스펙에 부합하는 ATG社의 PGX62-h-10 감속기<sup>[9]</sup>와 IGUS社의 NEMA23 스텝모터<sup>[10]</sup>를 사용하였다. 스텝모터는 1회전당 800 스텝을 지원하며, 이를 바탕으로 정기구학 연산을 통해 End-effector

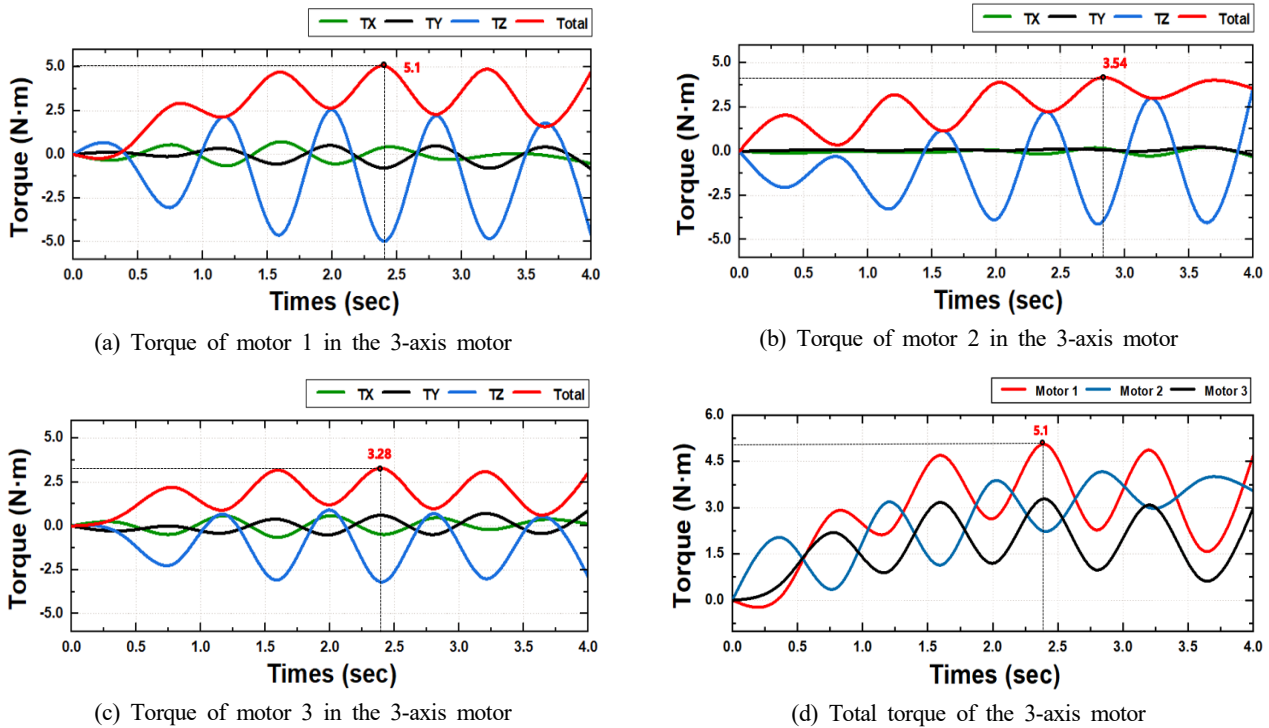


Fig. 7 Comparison of torque on each motor axis

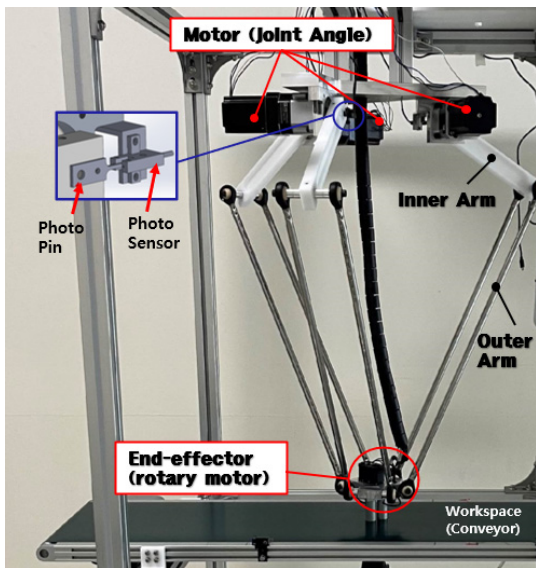


Fig. 8 The configuration of the manufactured delta robot

의 위치 오차율이 2.256 mm로 계산되어, 목표 정밀도인 3 mm 이내에서 시스템 요구 정밀도를 만족한다. 최종적으로 4 kg의 가 반하중을 적재할 수 있으며, 구동 범위는 (200 mm, 200 mm)에서 (-200 mm, -200 mm)까지 이동 가능하다. 또한 내부 위치 센서가 없는 스텝모터의 단점을 보완하기 위해 포토센서를 홈센서로 활용하여 피드백 시스템을 구축하였다. OMRON 사의 EE-SX672<sup>[11]</sup> 포토마이크로 센서를 사용하였으며, 이 센서는 불투명한 물체의

최소 두께가 0.8 mm로 탐지 가능하므로 이를 고려하여 포토 핀을 설계하였다. 포토센서의 반응 주파수는 최대 1 kHz로 설정하였으며, 이를 바탕으로 로봇 제어 시 홈센싱 인식 타이머 인터럽트의 주기를 결정하였다. 물체 정렬을 위한 회전 자유도가 있는 End-effector 단에 장착되는 모터로는 다이내믹셀 AX-12<sup>[12]</sup>가 사용되었다. 목표 물체는 작업공간에 해당하는 컨베이어에서 적재된다. 최종적으로 제작된 델타 로봇은 Fig. 8과 같다.

### 3. 제어 시스템 구축

#### 3.1 로봇 제어시스템

본 연구에서 구현된 3축 델타 로봇의 제어 시스템은 STM32 F429 보드를 기반으로 설계되었으며, 각 모터는 각속도 제어를 통해 동기화되어 목표 위치에 도달한다. 하드웨어에 제어 시스템을 적용하기에 앞서, 제어 시스템 설계 소프트웨어인 MATLAB의 Simulink 기능을 통해 로봇 제어 시스템의 전반적인 구조를 설계하였다<sup>[13]</sup>. 입력값은 X, Y, Z 좌표로 로봇의 목표 위치를 정의하고, 이를 바탕으로 I\_Kine 모듈을 작성하여 역기구학 연산을 통해 각각의 모터가 이동해야 할 각도  $\theta_A$ ,  $\theta_B$ ,  $\theta_C$ 로 변환된다. 각도 값은 3개의 컨트롤러로 전달되어 개별 모터의 제어에 활용되며, 이 과정에서  $y_{11}$ ,  $y_{22}$ ,  $y_{33}$ 은 역기구학 계산 결과로, 각 위치에 대한 모터의 각도를 의미한다. 각 모터는 Position controller를 통

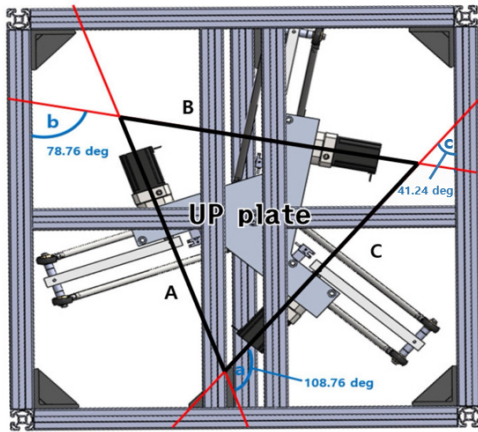


Fig. 9 Robot coordinate axes and frame axis mismatch

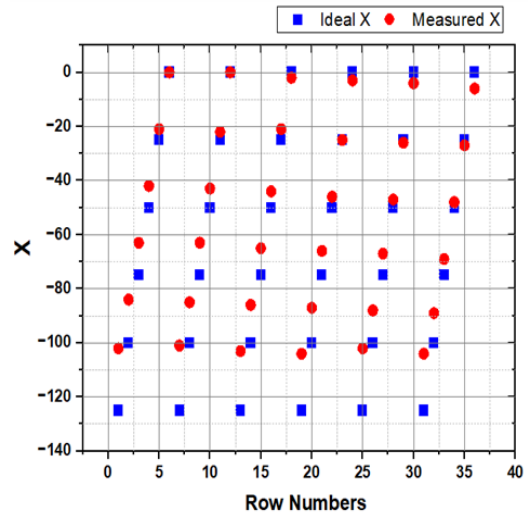
해 제어되며, 해당 모듈은 PWM 신호를 생성하여 스텝 모터의 각도를 조정한다. STM32F429 보드는 90 MHz 타이머 주기를 바탕으로 PWM 신호가 생성되게 설정하였으며, 이 신호는 스텝 모터 드라이버를 통해 모터로 전달된다<sup>[14]</sup>. 모터 드라이버는 A+, A-, B+, B-의 구동 신호를 모터에 전달하여, 목표 각도에 맞게 회전시킨다<sup>[15]</sup>. 최종적으로 설계된 블록 다이어그램은 Fig. 12에 제시되었으며, 이를 기반으로 실제 하드웨어에 적용하여 로봇 제어를 진행하였다.

### 3.2 로봇 캘리브레이션

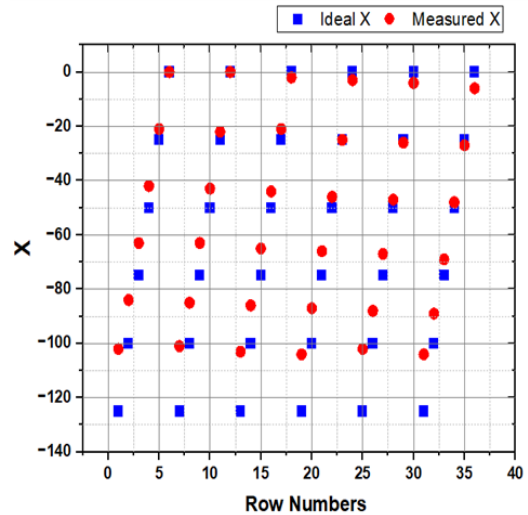
개발된 로봇 모델의 제작 과정 중, 일부 위치적 오차가 관찰되었다. 이러한 오차는 주로 기계적 정밀도의 한계와 초기 조립 단계에서의 정렬 불일치로 인해 발생하였다. 특히, Fig. 9와 같이 Up plate를 고정하는 과정에서 XY축 상의 각도 차이가 발생하였다. Fig. 13에서 빨간 선은 Up plate의 기존 위치를 나타내며, 각각의 각도 B(78.76°), C(41.24°), A(108.76°)는 B, C, A축을 기준으로 모터의 위치가 기존 Up plate와 차이가 있음을 보여준다. 이러한 각도 차이는 로봇의 작동 정밀도 및 반복 정확성에 오차가 생기기 때문에 로봇 캘리브레이션을 진행한다. 제작 오차를 극복하기 위해, 본 연구는 각 조인트의 위치를 정밀하게 조정할 수 있는 캘리브레이션 절차를 적용하였다. 오차의 영향을 최소화 하기 위해 좌표축을 일치시키기 위하여 행렬식 (4)의 회전 행렬을 프로그램상 적용하기 위하여 해를 구하였다. 로봇이 틀어진 각도는 20.76도이며 라디안 값은 0.3623이다. 구동을 위해 적용된 식은 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_n \\ P_o \\ P_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x &= \cos(0.3623) \times x - \sin(0.3623) \times y \\ y &= \sin(0.3623) \times x + \cos(0.3623) \times y \end{aligned} \quad (5)$$



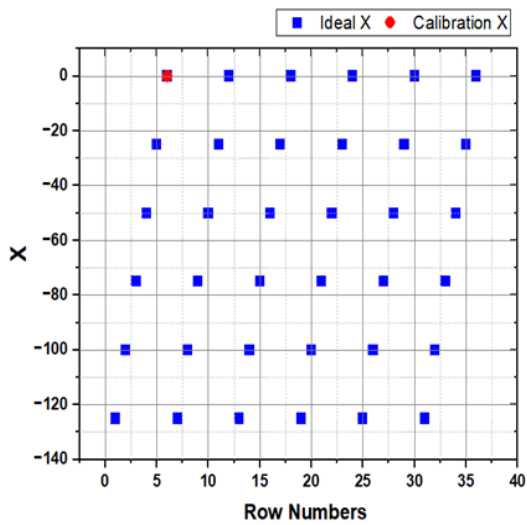
(a) Before X-plane calibration



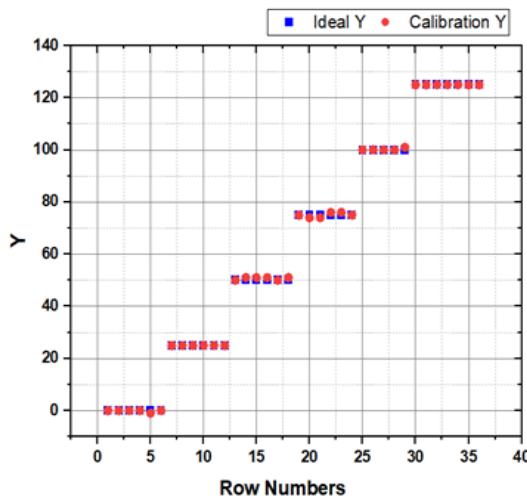
(b) Before Y-plane calibration

Fig. 10 Before X-plane and Y-plane calibration

본 연구에서 수행된 로봇 캘리브레이션 과정은 로봇의 작동 정밀도를 극대화하는 데 중점을 두었다. X축과 Y축 간의 위치 매핑은 제어 알고리즘을 통해 구현되었으며, 이상적인 위치 값과 실제 측정된 위치 값 간의 상관관계를 바탕으로 알고리즘을 구축하였다<sup>[16]</sup>. 이 과정은 델타 로봇 구동 환경에서 반복 실험을 통해 진행되었으며, 각 실험에서는 로봇의 동작 경로와 각도에 따른 위치 오차를 분석하였다. End-effector의 이동 시간이 원점에서 목표 위치까지 1.5초 이내로 설정되었다. 수집된 데이터는 통계적 방법을 통해 분석되었으며, 그 결과 X축과 Y축의 오차 패턴이 도출되었다. Fig. 10의 (a)와 (b)는 각각 X축과 Y축에서 발생한 위치 오차를 보여주며, Fig. 11의 (a), (b)는 각각 X축과 Y축의 캘리브레이션 후 위치 제어의 정확도가 향상된 결과를 나타낸다. 최종적으로 위치 오차는 3 mm 이내로 감소되었다. 위치 오차를 보정한 후, 좌표



(a) After X-plane calibration



(b) After Y-plane calibration

Fig. 11 After X-plane and Y-plane calibration

를 입력하면 이를 기반으로 역기구학 수식을 적용하여 스텝 모터에 직접 입력될 신호를 생성하는 블록 다이어그램을 작성한다. 블록 다이어그램은 각 좌표에 대응하는 스텝 모터의 구동 각도를 계산하고, 이를 Angle A, B, C로 변환하여 각각의 모터에 전달되도록 설계되었다<sup>17)</sup>. 최종적으로, 앞선 과정들을 통해 입력된 좌표 값에 따라 로봇의 End-effector가 목표 위치로 정확히 이동할 수 있도록 구현하였다. Fig. 12의 블록 다이어그램은 MATLAB 환경에서 각 신호의 흐름을 나타내며, 각 축의 모터에 전달되는 신호 변화를 시각적으로 확인하고, 입력된 좌표값이 실제 스텝 모터로 전달되어 로봇의 동작을 최종적으로 제어한다. 위치 제어 시스템을 구축한 후<sup>18)</sup>, 실제 제조 현장의 시퀀스를 적용하였다. Pick and place 작업의 일환으로, 소형 직사각형 물체를 작업 공간에 무작위로 배치한 후 델타 로봇이 이를 올바르게 정렬하는 시퀀스를 구축하였다. 동작 수행을 위해 포토센서 인터럽트를 사용하여 로봇 팔을 90도로 정렬시켰으며, 물체 정렬을 위한 추가적인 비전 시스템을 구축하여 물체의 위치와 자세를 감지하여 로봇의 정렬 작업이 정확하게 이루어지도록 구축하였다<sup>19)</sup>. 비전 시스템과 위치 제어가 적용된 델타 로봇의 시퀀스는 Fig. 13에 제시되어 있다. 시스템은 직사각형 물체가 적재된 컨베이어가 정지한 후, 비전 시스템을 통해 물체의 형태와 위치 정보를 추출하는 과정으로 시작된다. 영상 처리 알고리즘을 통해 물체의 정확한 위치 좌표가 계산되고, 이후 물체는 델타 로봇의 작업 영역으로 이동한다. 작업 영역에 도달한 물체는 다시 한 번 컨베이어가 정지하고, Raspberry Pi(RPI)에서 STM32F429 보드인 마이크로컨트롤러로 좌표 값이 전송된다. STM32F429는 역기구학 연산을 통해 델타 로봇의 동작을 계산하여 물체를 정렬하거나 이동시키는 작업을 수행한다<sup>20)</sup>. 정렬된 물체는 컨베이어 벨트를 통해 지정된 위치로 이송되며, 이어서 새로운 물체가 이송되는 과정이 반복된다. 이 시스템은 비전 시스

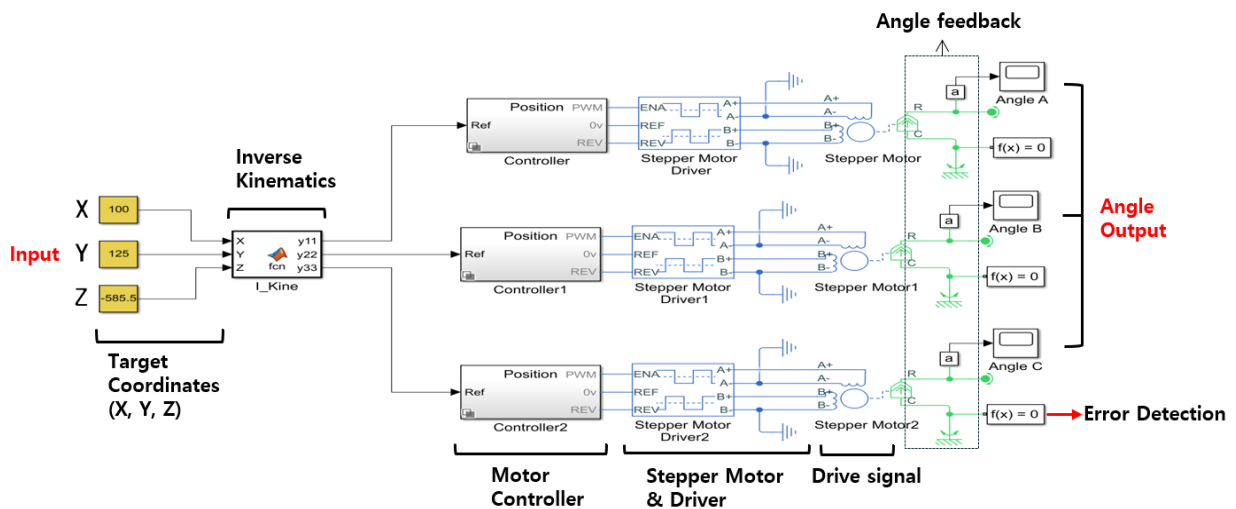


Fig. 12 Block diagram of the delta robot control system

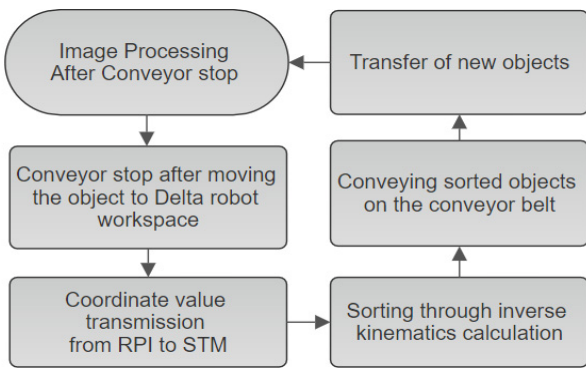


Fig. 13 Delta robot system flow chart

테프과 델타 로봇을 결합하여 정확한 위치 제어와 자동화된 작업을 수행한다<sup>[21]</sup>.

#### 4. 영상처리 시스템 개발

##### 4.1 물체 인식을 향상을 위한 영상처리

소형 물체의 정밀한 정렬을 위해 물체 인식률의 향상은 델타 로봇 성능 개선에 필수적인 요소로 작용한다. 본 연구에서는 영상처리 기술을 이용해 정형화된 물체를 정확히 인식하고, 각도, 좌표, 색상 정보를 추출할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 실제 산업 현장의 요구를 충족하기 위해 R, G, B 색상을 가진 직사각형 물체를 대상으로 실험되었다. OpenCV를 활용하여 물체 정보 추출 알고리즘을 개발하였으며, 원근 보정 알고리즘과 물체 색상 구분을 위한 HSV 모델을 적용해 색상 영역에 따른 영상 이진화를 진행하였다<sup>[22]</sup>. 원근 보정 알고리즘(perspective correction algorithm)은 3차원 공간의 물체가 2차원 영상에서 왜곡되는 문제를 해결한다<sup>[23]</sup>. 카메라의 각도 및 위치에 따른 왜곡은 정확한 인식과 정렬을 어렵게 하며, 이를 극복하기 위해 호모그래피 변환을 적용하였다. 호모그래피는 두 평면 사이의 투영 변환을 수학적 모델로 설명하며, 직사각형 물체와 왜곡된 이미지 좌표 사이의 관계를 나타낸다. 이를 통해 각도나 거리로 인한 왜곡을 보정하였다. 원근 보정은 이미지에서 특징점을 추출한 후, 호모그래피 계산을 통해 이미지를 변환하는 방식으로 진행되었다. 또한, HSV 모델을 적용하여 직사각형 물체의 색상을 구분하였다<sup>[24]</sup>. HSV 모델은 조명 변화와 명도에 덜 민감하다는 이점이 있어 산업 현장에서 물체의 색상을 정확히 구분하는 데 적합하다. RGB 이미지를 HSV 색상 공간으로 변환한 후, 물체의 색상 범위를 설정하여 Hue, Saturation, Value 값을 지정하였다. OpenCV 함수를 이용하여 설정된 범위 내의 색상을 이진화하였다. 알고리즘 개발 과정에서 빛에 의한 노이즈를 줄이고, 정확한 사각형 형태를 추출하기 위해 팽창-침식 알고리즘을 적용하였다. 이때, 팽창 커널 크기는 5, 침식

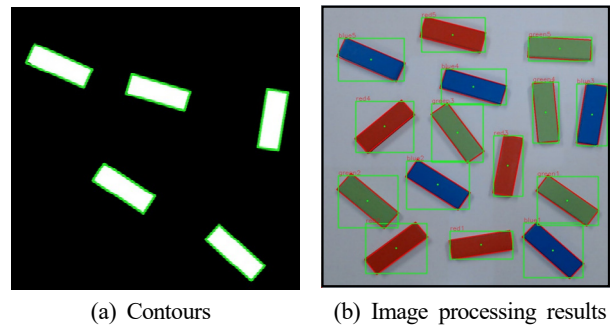


Fig. 14 Vision contour and small object recognition

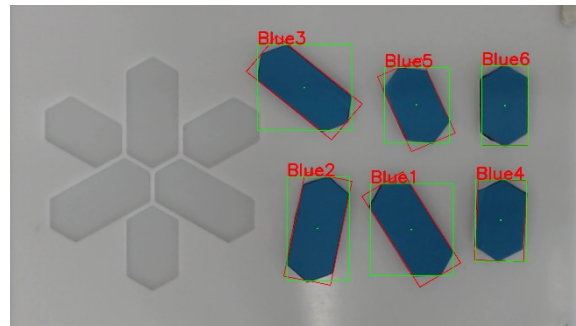


Fig. 15 Image processing of irregular pentagonal object

커널 크기는 3으로 설정되었다. 팽창-침식 알고리즘은 이진화된 이미지에서 물체의 형상과 크기를 보정하여, 정확한 물체 인식과 정렬을 수행하도록 한다. 적재 대상 물체는 R, G, B 색상을 가진 직사각형 물체로, 크기는 End-effector가 적재 시 각도를 조절하여 옮길 수 있도록 2.5×7.5 cm로 선정되었다. 원근 보정 알고리즘을 적용하여 기울기 보정을 수행하였다. Fig. 14의 (a)는 적재 대상 중 파란색 물체에 대해 HSV를 활용한 색상 구간별 이진화를 진행한 후, 팽창-침식 연산을 각각 적용하고, 최종적으로 (b)에 나타난 것과 같이 Contour 알고리즘을 적용하여 외곽선을 검출하였다. 외곽선 정보를 바탕으로 최소 직사각형 형태를 추출하며, 직사각형의 좌표를 통해 물체의 중심점과 각도를 추출하여 데이터를 생성한다. 최종적으로 직사각형 물체의 정보가 정확하게 추출되었음을 확인할 수 있다. 해당 물체의 중심점 좌표와 각도와 같은 주요 정보는 추출된 후 알고리즘에 의해 처리되었으며, 이 과정에서 오류 없이 정확한 데이터를 확보하였다. 추출된 모든 정보는 SQL Database로 자동으로 저장되도록 알고리즘이 구축되었다. 이러한 데이터 저장 과정은 델타 로봇 시스템의 효율적인 제어와 연동을 위한 필수적인 단계로서, 이후 로봇의 위치 제어와 정밀한 동작 수행에 기여하게 된다. 본 연구에서는 소형 직사각형 물체뿐만 아니라, 길이와 크기가 상이한 비정형 오각형 물체를 대상으로 동일한 알고리즘을 적용하여 실험을 수행하였다. 오각형 물체는 Fig. 15와 같으며 소형 직사각형 물체와 동일한 알고리즘이 적용됨을



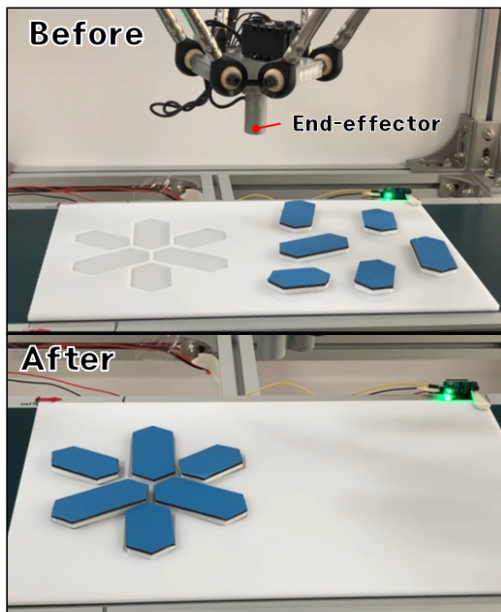


Fig. 16 Completed alignment of the object

확인할 수 있다. Fig. 16에 따르면, 물체를 무작위로 배치된 상태에서도 로봇의 End-effector는 물체의 위치와 각도를 실시간으로 인식하여, 음각이 파여 있는 Plate에 정확하게 배치하는 결과를 도출한다.

비전 시스템과 결합된 제어 알고리즘을 통해, 로봇이 다양한 형태와 크기의 물체에 대해 일정한 정밀도를 유지하며 작업할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해 비정형 물체에 대한 적용 가능성도 입증되었다. 향후 후속 연구에서는 구형 물체와 같은 다양한 형태의 물체에 대한 실험을 추가할 예정이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 델타 로봇의 정밀한 물체 인식 및 위치 제어를 목표로, 영상 처리 기술과 제어 알고리즘을 결합한 시스템을 제안하고 이를 검증하였다. 직사각형 물체의 색상과 기하학적 정보를 정확하게 추출하기 위해 HSV 모델과 원근 보정 알고리즘을 적용하였으며, 팽창-침식 연산을 통해 잡음 제거와 물체의 외곽선을 검출하는 과정을 수행하였다. 또한, 델타 로봇의 동작과 위치 제어를 위해 FEM(유한 요소 해석) 시뮬레이션을 통해 구조적 안정성과 성능을 검증하였다. 이를 통해, 로봇의 End-effector가 높은 정밀도로 물체를 이동 및 정렬할 수 있음을 확인하였으며, 실험 결과, 위치 제어가 정확하게 수행되었음을 입증하였다. 본 연구에서 제안한 델타 로봇 시스템은 성능 목표였던 4 kg의 가반하중을 처리하며, 목표 위치에 1.5초 이내에 도달하였고, 정밀도는 3 mm 이내로 유지됨을 확인하였다. 이러한 성능은 로봇이 고정밀 작업에서

안정적으로 동작할 수 있음을 입증하여 다양한 작업 환경에서의 가능성을 보여준다. 향후 본 시스템을 활용하여 기존의 작업 공간 외에 다양한 작업 환경에서 델타 로봇의 성능을 추가로 검증할 예정이며, 특히 물체의 다양한 형태와 크기에 대한 대응 능력을 실험할 계획이다. 추가로 실제 산업 현장에서 물류 및 제조 공정에 적용될 수 있도록 시스템의 효율성 및 적용 가능성을 평가할 예정이다.

## 후 기

이 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였으며 [(GRRC한국공대2024-B02), 3D 프린팅 후처리 자동화를 위한 도킹시스템 및 공정기술 개발], 2024년도 산업통장자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임[(20023152), 고집적 반도체 검사용 마이크로 반도체소켓].

## References

- [1] Nussibaliyeva, A., Sergazin, G., Tursunbayeva, G., Uzbekbayev, A., Zhetenbayev, N., Nurgizat, Y., Bakhtiyar, B., Orzaliyeva, S., Yussupova, S., 2024, Development of an Artificial Vision for a Parallel Manipulator Using Machine-to-Machine Technologies, *Sensors*, 24:12 3792, <https://doi.org/10.3390/s24123792>.
- [2] Le, H. P., Vo. C. D., Thai, H. T., 2023, Design a Low-cost Delta Robot Arm for Pick and Place Applications Based on Computer Vision, *FME Transactions*, 51:1 99-108, <https://doi.org/10.5937/fme2301099P>.
- [3] Le, M. V., Bégoç, V., Briot, S., 2023, Modeling and Design of a Five Degrees-of-Freedom Delta-Like Robot for Fast Pick-and-Place Applications, *J. Mech. Des.*, 145:12 123302, <https://doi.org/10.1115/1.4063359>.
- [4] Cretescu, N., Neagoie, M., Saulescu, R., 2023, Dynamic Analysis of a Delta Parallel Robot with Flexible Links and Joint Clearances, *Appl. Sci.*, 13:11 6693, <https://doi.org/10.3390/app13116693>.
- [5] Lee, J. G., Lee, S. R., Lee, C. Y., Yang, S. H., 2014, Dynamic Modeling of 2 DOF Parallel Manipulator, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 31:10 897-904, <http://doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.10.897>.
- [6] Schappler, M., Tappe, S., Ortmaier, T., 2019, Modeling Parallel Robot Kinematics for 3T2R and 3T3R Tasks Using Reciprocal Sets of Euler Angles, *Robotics*, 8:3 68, <https://doi.org/10.3390/>

- robotics8030068.
- [7] Kim, K., Lee, S., Kim, K., Lee, K., Heo, S., Park, K., Jeong, J., Kim, J., 2010, Development of the End-effector Measurement System for a 6-axis Welding Robot, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 11 519-526, <https://doi.org/10.1007/s12541-010-0060-x>.
- [8] Laribi, M. A., Romdhane, L., Zeghloul, S., 2007, Analysis and Dimensional Synthesis of the DELTA Robot for a Prescribed Workspace, *Mech. Mach. Theory*, 42:7 859-870, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.06.012>.
- [9] ATG, n.d., viewed 20 November 2024, PGX-H, <<https://atg.modoo.at/?link=20qxgrt0>>.
- [10] IGUS, n.d., viewed 20 November 2024, Drylin®, Step Motor, NEMA23, <<https://www.igus.kr/info/drive-technology-stepper-motor-nema-23>>.
- [11] OMRON, n.d., viewed 20 November 2024, EE-SX47/EE-SX67. <[https://www.ia.omron.co.kr/products/product\\_detail2.asp?list\\_code2=001003001&prodPk=70](https://www.ia.omron.co.kr/products/product_detail2.asp?list_code2=001003001&prodPk=70)>.
- [12] ROBOTICS, n.d., viewed 20 November 2024, AX-12A, <<https://www.robotis.com/>>.
- [13] Laski, P. A., Smykowski, M., 2021, Using a Development Platform with an STM32 Processor to Prototype an Inexpensive 4-DoF Delta Parallel Robot, *Sensors*, 21:23 7962, <https://doi.org/10.3390/s21237962>.
- [14] George, R., , Manoj, G, Kanthalakshmi, S., 2014, Design and Implementation of PWM Stepper Motor Control Based on 32-Bit ARM Cortex Processor, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3:7 10617-10622, <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0307048>.
- [15] Li, Z., Li, S., Luo, X., 2021, An Overview of Calibration Technology of Industrial Robots, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8:1 23-36, <https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003381>.
- [16] Zhao, A., Toudeshki, A., Ehsani, R., Sun, J.-Q., 2023, Data-Driven Inverse Kinematics Approximation of a Delta Robot with Stepper Motors, *Robotics*, 12:5 135, <https://doi.org/10.3390/robotics12050135>.
- [17] Gholami, A., Homayouni, T., Ehsani, R., Sun, J.-Q., 2021, Inverse Kinematic Control of a Delta Robot Using Neural Networks in Real-Time, *Robotics*, 10:4 115, <https://doi.org/10.3390/robotics10040115>.
- [18] Jang, T. H., Kim, Y., Kim, H., 2016, Comparison of PID Controllers by Using Linear and Nonlinear Models for Control of Mobile Robot Driving System, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 33:3 183-190, <http://doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.3.183>.
- [19] Tran, V. D., Nguyen, Q. N., Dang, D. V., Nguyen, Q. V., Pham, N. D., Tran, V. H., 2021, Design of Delta Robot Using Image Processing for Product Sorting Process, 2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 210-214, <https://doi.org/10.1109/ICSSE52999.2021.9538412>.
- [20] Zhang, G. Y., Liu, G. F., Guo, X. B., Lin, X. Y., 2016, Dynamic Conveyor Tracking Control of a Delta Robot, *Key Engineering Materials*, 679 43-48, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.679.43>.
- [21] Kang, H.-C., Han, H.-N., Bae, H.-C., Kim, M.-G., Son, J.-Y., Kim, Y.-K., HSV Color-Space-Based Automated Object Localization for Robot Grasping without Prior Knowledge, *Appl. Sci.*, 11:16 7593, <https://doi.org/10.3390/app11167593>.
- [22] Wu, L., Shang, Q., Sun, Y., Bai, X., 2019, A Self-adaptive Correction Method for Perspective Distortions of Image, *Front. Comput. Sci.*, 13:3 588-598, <https://doi.org/10.1007/s11704-018-7269-8>.
- [23] Luo, J., Zhao, J., Xie, C., Yi, S., Liu, X., Yan, Z., 2023, Image-based Bolt-loosening Detection using an Improved Homography-based Perspective Rectification Method, *J. Civ. Struct. Health Monit.*, 14 513-526, <https://doi.org/10.1007/s13349-023-00722-4>.
- [24] Abba, S., Bizi, A. M., Lee, J.-A., Bakouri, S., Crespo, M. L., 2024, Real-time Object Detection, Tracking, and Monitoring Framework for Security Surveillance Systems, *Heliyon*, 10:15 e34922, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34922>.



**Sujin Jeong**

Researcher in the Department of Mechatronics Engineering at Tech University of Korea. Her research focuses on Mechanical Design and CAE Simulation.  
E-mail: [tnwlsqml@tukorea.ac.kr](mailto:tnwlsqml@tukorea.ac.kr)



**Haewon Kang**

Researcher in the Department of Mechatronics Engineering at Tech University of Korea. Her research focuses on Vision and Control Algorithm Development.  
E-mail: [kaa7189@tukorea.ac.kr](mailto:kaa7189@tukorea.ac.kr)



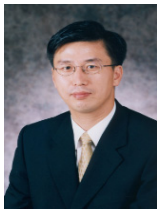
**Hyeong-gu Je**

Researcher in the Department of Mechatronics Engineering at Tech University of Korea.  
His research focuses on Control Algorithm Development.  
E-mail: [jhg9589@tukorea.ac.kr](mailto:jhg9589@tukorea.ac.kr)



**Seung-woo Lee**

Researcher in the Department of Mechanical Engineering at Tech University of Korea.  
His research focuses on Mechanical Design and CAE Simulation.  
E-mail: [swlee@tukorea.ac.kr](mailto:swlee@tukorea.ac.kr)



**Jaehong Shim**

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea.  
His research interests are Autonomous Mobile Robot Navigation with Visual SLAM and Image Processing System like as Robot Hand-eye.  
E-mail: [jhshim@tukorea.ac.kr](mailto:jhshim@tukorea.ac.kr)



**Kihyun Kim**

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea.  
His research interests are Design and Control for High Performance Mechatronics and New Patterning Process and Systems.  
E-mail: [khkim12@tukorea.ac.kr](mailto:khkim12@tukorea.ac.kr)



**Hyo-young Kim**

Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea.  
His research interests are Robotic Manufacturing System with AI Technology and Precision Control System.  
E-mail: [kimhy@tukorea.ac.kr](mailto:kimhy@tukorea.ac.kr)