

고정밀 로봇을 이용한 2D 비전시스템의 교정

Calibration of 2D Vision System Using High-precision Robot

조민주¹, 김진¹, 하정민¹, 윤재용¹, 김태부¹, 김갑순^{2,#}Min Ju Cho¹, Jin Kim¹, Jeong Min Ha¹, Jae Yong Yoon¹, Tae Bu Kim¹, and Gab Soon Kim^{2,#}¹ 경상국립대학교 대학원 제어로봇공학과 (Department of Control & Robot Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University)² 경상국립대학교 제어로봇공학과 (Department of Control & Robot Engineering (ERI), Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: gskim@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1745

ORCID: 0000-0002-1753-3319

KEYWORDS: 2D vision (2D 비전), Size measurement (크기 측정), Calibration (교정), Pixel size (화소 크기), Precision movement (정밀 이동)

This paper describes the calibration of a 2D vision system utilizing a high-precision robot that moves accurately along the z-axis. To achieve this, a one-axis high-precision robot was designed and manufactured, achieving a minimum travel distance of 0.007 μm during testing. The 2D vision system comprised an RGB camera, an LVDT sensor, and a laser sensor for distance measurement. Additionally, a subpixel-based algorithm was developed for the calibration and size measurement of the system. Following the calibration process with the high-precision robot, the size error was found to be within ± 0.1 mm when using the LVDT sensor and ± 0.2 mm with the laser sensor. Thus, the 2D vision system and calibration algorithm presented in this paper are deemed suitable for accurate object measurement by robots.

Manuscript received: June 17, 2026 / Revised: July 3, 2026 / Accepted: July 8, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

1. 서론

최근 산업 자동화 분야에서 로봇은 단순 반복 작업을 넘어 부품 조립, 품질 검사 등과 같은 지능형 작업을 수행하고 있다. 로봇이 이러한 작업을 진행하기 위해서는 대상 물체를 인식하고 크기와 위치를 정밀하게 측정할 수 있어야 한다. 크기 및 위치 측정을 위한 비전시스템에는 카메라를 포함하게 되는데, 이것의 종류로는 2D 카메라, 3D 카메라, 라인스캔 카메라 등이 있다. 3D 카메라는 이미지와 함께 깊이 정보를 기록하여 3차원 데이터를 생성하는 카메라이고, 라인스캔카메라는 1 px 두께의 선을 연속 촬영하여 하나의 평면 이미지를 출력하는 카메라이며, 산업환경에서 비전시스템으로 활용되고 있는 카메라는 다음과 같다.

산업 현장에서 사용되는 3D 카메라 중에서 Gemini305 [1]는 깊이 및 RGB 이미지의 해상도가 $1,280 \times 800$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 1\%$ 이고, D405 [2]는 깊이 및 RGB 이미지의 해상도가

$1,280 \times 720$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 2\%$ 이며, CS30 [3]은 깊이 이미지의 해상도가 640×480 px, RGB 이미지의 해상도가 $1,920 \times 1080$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 2\%$ 이다. 그리고 STM-501u [4]는 깊이 이미지의 해상도가 $1,280 \times 800$ px, RGB 이미지의 해상도가 $1,920 \times 1,080$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 1.5\%$ 이고, ZED X [5]는 깊이 및 RGB 이미지의 해상도가 $1,920 \times 1,200$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 4\%$ 이다. 지금까지 개발된 3D 카메라의 사양은 이미지 해상도가 $640 \times 480 - 1,920 \times 1,200$ px, 깊이 측정 정밀도가 $\pm 1-4\%$ 정도였고, 이것은 대상 객체의 크기 및 공간적 위치를 물리적 치수로 즉각 변환할 수 있다는 장점이 있으나, 높은 비용(최대 3,000만원) 대비 이미지 해상도 및 깊이 측정 정밀도가 상대적으로 낮다는 한계가 있다.

시중에 판매되는 있는 라인스캔 카메라의 해상도는 LA-GC-04K05B [6]가 $4,096 \times 2$ px이고, raL8192-80km [7]이 $8,192 \times 1$ px이며, VL-16K3.5XG-C30 I-2 [8]가 $16,384 \times 2$ px이다. 그리고 TRI02KA-MC [9]가 $2,048 \times 1$ px이고, LB-16KG35 [10]가

16,384 × 2 px이다. 지금까지 개발된 라인스캔카메라의 이미지 해상도는 2,048 × 1 – 16,384 × 2 px 정도였고, 이것은 고해상도 이미지 획득이 가능하다는 장점이 있으나, 높은 비용(최대 2,500만원)이 요구되어 산업 현장에 적용하기엔 경제적 부담으로 작용하게 된다.

따라서 비용 문제를 해결하고 높은 정밀도를 유지하기 위해서는 비교적 저렴한 2D 카메라와 거리측정센서로 구성된 비전 시스템을 설계할 수 있다. 이러한 구성의 비전시스템의 경우, 이미지 내 화소의 물리적인 크기를 계산해야 하는 과정이 필요하고, 이 과정을 교정이라고 한다. 2D 비전시스템의 교정 과정에서는 카메라와 물체 사이의 거리를 알아야 하고, 이를 정밀하게 측정하기 위해 접촉식 거리측정 센서를 사용하게 되면 정밀한 움직임을 가진 로봇이 필수이다. 상용화된 협동로봇 및 산업용 로봇의 반복 정밀도는 다음과 같다.

협동로봇으로 개발된 CRX-3iA [11]가 ±0.02 mm, GoFa5 [12]가 ±0.02 mm, UR15 [13]가 ±0.05 mm, Indy7 [14]이 ±0.1 mm, P3020 [15]이 ±0.1 mm, 산업용 로봇으로 개발된 GP50 [16]가 ±0.03 mm, KR 6 R1840-2 [17]가 ±0.04 mm, HDF4-5 [18]가 ±0.02 mm이고, 지금까지 개발된 협동로봇 및 산업용 로봇의 반복 정밀도는 ±0.02–0.1 mm 정도로 나타나 있다. 2D 카메라와 거리측정센서(레이저센서, LVDT 센서)로 구성된 비전시스템을 정밀하게 교정하기 위해서는 거리조절이 ±0.001 mm이내의 정밀도를 가진 고정밀 로봇의 설계가 필요하고, 비교적 정밀도가 높고 저렴한 2D 비전시스템(2D 카메라와 거리측정센서)의 정밀한 교정이 필요하다.

본 논문에서는 상하로 정밀하게 이동하는 고정밀 로봇을 설계 및 제작하고, 2D 카메라와 거리측정센서(레이저센서, LVDT 센서)로 저렴한 2D 비전시스템을 구성한다. 이 2D 비전시스템의 교정 및 크기측정 알고리즘을 개발하고, 고정밀 로봇의 특성 실험 및 개발한 알고리즘을 이용한 2D 비전시스템의 교정을 실시한다.

2. 2D 비전시스템 및 고정밀 로봇의 설계 및 제작

2.1 2D 비전시스템의 교정 원리

Fig. 1은 2D 비전시스템의 교정 원리를 나타내고 있고, 비전 시스템에 구성된 카메라의 화소크기는 카메라와 물체 사이의 거리에 비례함을 보여준다. 다양한 물체를 측정하는 경우, 카메라와 물체 사이의 거리가 달라지게 되고, 카메라로 물체의 크기나 위치를 정확하게 측정하기 위해서는 카메라와 물체 사이의 거리에 따른 화소크기를 정확하게 알아야 하며, 거리에 대한 화소크기를 비례식으로 나타낼 수 있다. 이러한 과정을 교정이라고 하고, 2D 비전시스템의 교정을 위해선 카메라와 물체 사이의 거리를 정확하게 알아야 하며, 이를 위해선 상하로 정밀하게 동작 가능한 고정밀 로봇이 필요하다.

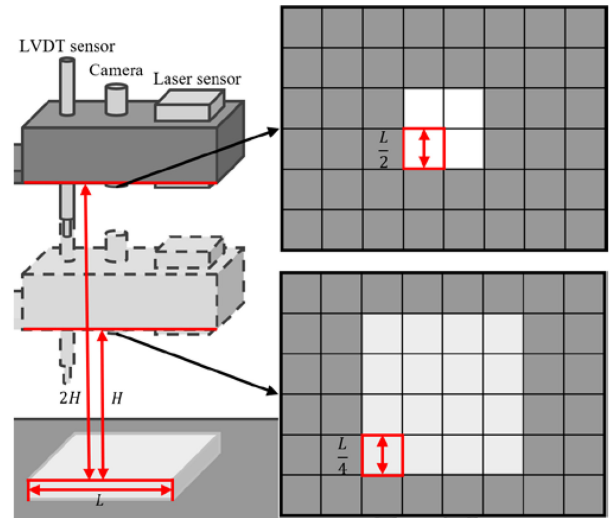


Fig. 1 Calibration principle of 2D vision system

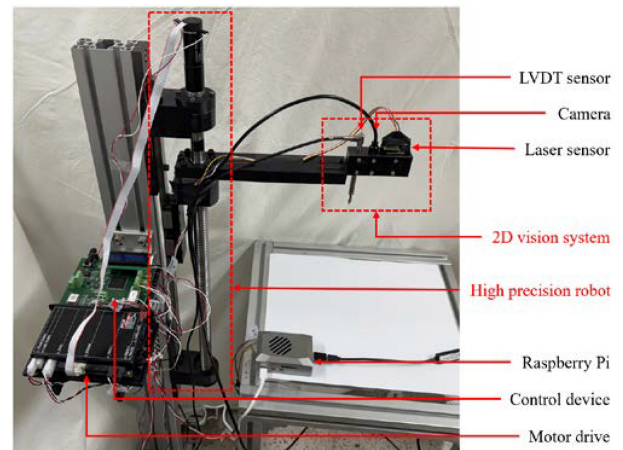


Fig. 2 Manufactured 2D vision system and high precision robot

2.2 2D 비전시스템 및 고정밀 로봇의 구성

Fig. 2는 제작된 2D 비전시스템과 고정밀 로봇을 나타내고 있고, 이것은 2D 비전시스템, 고정밀 로봇, 모터 드라이버, 제어 장치, 라즈베리 파이 등으로 구성되어 있다.

2D 비전시스템은 카메라(PS-AEC5003), LVDT 센서(F50-10MM-RS485-S2), 레이저센서(SEN0366)를 포함하고 있고, 측정 대상의 크기 및 2D 비전시스템과 대상 간의 거리를 측정하는 기능을 수행하며, 2D 비전시스템에서 도출되는 정보는 라즈베리 파이 및 제어 장치로 전송되어 상황에 따라 고정밀 로봇을 제어하는 데 활용된다. 2D 비전시스템의 사양은 카메라가 최대 해상도 2,592 × 1,944 px, LVDT 센서가 측정 분해능 0.1 μm, 반복 오차 ±1.0 μm, 레이저센서가 측정 분해능 0.1 mm, 반복 오차 ±1.0 mm이다. 이것의 비용은 카메라가 94,000원, LVDT 센서가 560,000원, 레이저센서가 106,000원이다

고정밀 로봇은 모터(Maxon DC Motor 339150), 볼스크류

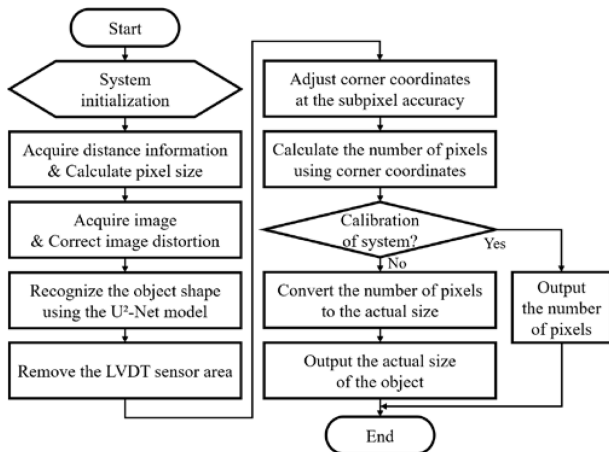


Fig. 3 Measurement algorithms for 2D vision system

(C-TBSE2505), LM 가이드, 수직고정판 등으로 구성되어 있고, 제어 장치의 신호에 맞게 2D 비전시스템을 상하로 정밀하게 이동시키는 역할을 하며, 각각의 사양은 모터 엔코더(Maxon Sensor 225780)의 분해능이 1,000 CPR (Count Per Revolution), 모터 기어(Maxon Gear 4406771) 감속비가 181, 볼스크류의 리드가 5 mm이다. 이를 바탕으로 산출된 모터 1회전에 요구되는 펄스수는 724,000 pulse이고, 볼스크류의 리드값에 모터의 1회전당 필요 펄스수로 나누면 단위 펄스에 따른 이동거리가 되며, 계산된 단위 펄스에 따른 이동거리는 0.007 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 이다. 따라서 고정밀 로봇의 최소 이동거리(구동 분해능)는 0.007 μm 로 설계되었고, 이것은 LVDT 센서의 측정 분해능(0.1 μm)보다 정밀하게 움직이므로써 2D 비전시스템의 측정 오차를 최소화하기 위함이다.

2D 비전시스템은 크기측정을 위해 고정밀 로봇을 이용하여 상하로 움직이고, 고정밀 로봇의 동작 범위는 0–300 mm이다. 그러나 2D 비전시스템에 포함된 LVDT 센서가 센서고정블록의 아랫면으로부터 60 mm 아래로 돌출되어 있고, 이러한 제약으로 인해 2D 비전시스템은 상하로 60–300 mm 범위에서 측정 가능하다.

2.3 2D 비전시스템의 측정 알고리즘 개발

Fig. 3은 2D 비전시스템의 측정 알고리즘을 나타내고 있고, 이것은 센서로부터 획득한 거리정보와 대상 이미지를 기반으로 수행되며, 2D 비전시스템의 교정 시에는 측정 대상의 가로 및 세로의 화소수와 거리정보를, 크기측정 시에는 물리적 크기를 산출한다. 2D 비전시스템의 측정 알고리즘의 세부 과정은 다음과 같다.

시스템 초기화가 완료되면 거리측정센서(레이저센서, LVDT 센서)를 활용하여 카메라와 측정 대상 간의 거리정보를 획득한다. 2D 비전시스템의 거리측정방법은 Fig. 4와 같으며, 이에 대한 과정은 다음과 같이 세 단계로 진행된다. 먼저, ① LVDT 센서를 이용하여 대상에 대한 접촉식 거리측정을 수행하고, ② 이미지 취득을 위한 목표 높이로 2D 비전시스템을 이동시킨다. 이때,

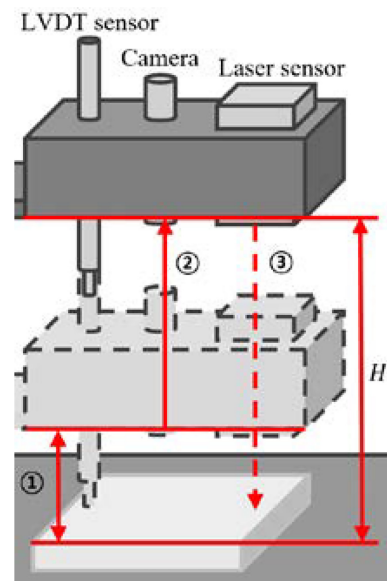


Fig. 4 Distance measurement method of 2D vision system

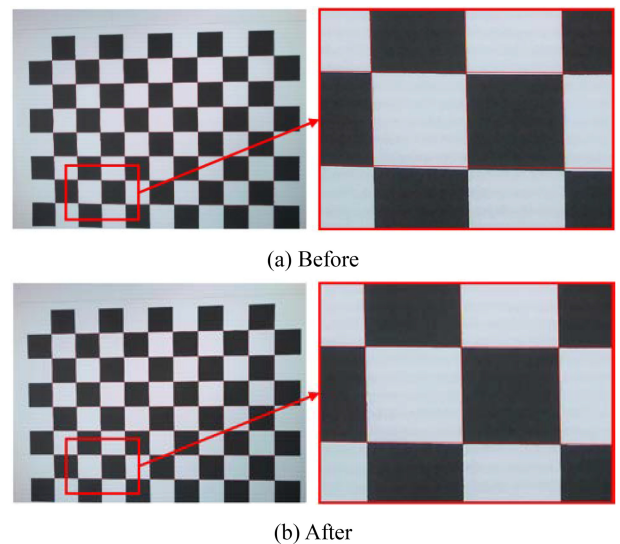


Fig. 5 Image distortion correction of 2D vision system

고정밀 로봇의 최소 이동거리를 기반으로 요구되는 펄스수를 계산하여 정밀한 위치 제어를 수행한다. ③ 2D 비전시스템이 목표 높이에 도달하면 레이저센서를 통해 비접촉식 거리 측정을 수행한다. 이 과정을 통해 획득한 거리정보는 2D 비전시스템의 작동 목적에 따라 두 가지로 활용된다. 시스템 교정 시에는 거리와 화소크기 간의 관계식을 도출하는 데 사용되고, 측정 대상의 크기측정 시에는 시스템 교정에서 도출된 거리와 화소 크기의 관계식에 대입하여 해당 거리에서의 화소 크기를 산출하는 데 사용된다.

거리 정보 획득 후, 카메라를 이용하여 측정 대상의 이미지를 취득한다. 이때, 취득된 이미지는 렌즈의 광학적 특성 등으로 인한 왜곡을 포함하게 되고, 이것은 대상 크기를 정밀하게 측정하는 데 있어 오차 발생의 요인으로 작용할 수 있다. 이러한

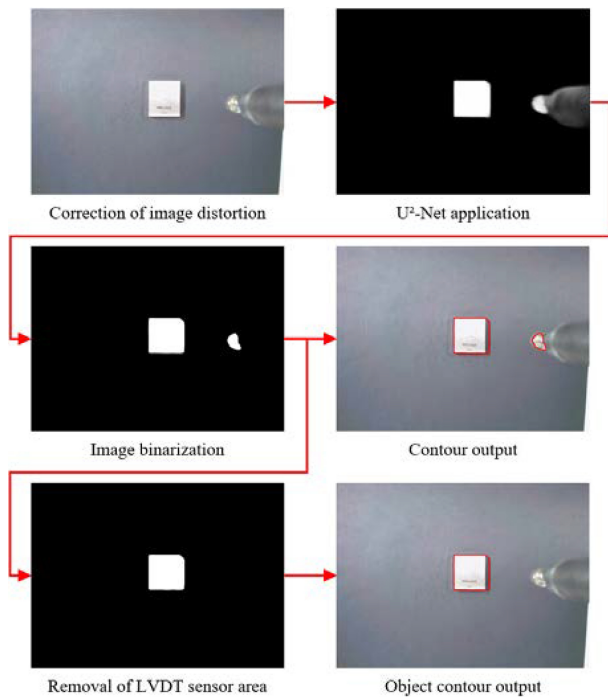


Fig. 6 Shape recognition process of a measurement target using U²-Net

오차를 최소화하기 위해 사전에 체커보드 패턴을 활용한 카메라 왜곡 교정을 수행하여 왜곡 파라미터를 도출하였고, 이것을 취득된 이미지에 적용하여 이미지의 왜곡을 보정한다. Fig. 5는 2D 비전시스템의 이미지 왜곡 보정을 나타내고 있고, Fig. 5(a)는 왜곡 보정 전의 이미지이며, Fig. 5(b)는 왜곡 보정 후의 이미지이다. 이를 통해 이미지의 왜곡이 개선되었음을 확인할 수 있다.

왜곡 보정이 완료된 이미지는 객체 탐지 모델인 U²-Net의 입력 데이터로 사용되어 측정 대상의 형상을 추출한다. Fig 6은 U²-Net을 적용한 측정 대상의 형상 인식 과정을 나타내고 있다. U²-Net 모델을 통한 형상 인식 과정에서 측정 대상뿐만 아니라 이미지 내에 위치한 LVDT 센서 일부가 인식 객체로 함께 추출될 수 있는데, 이를 보완하기 위해 이미지 내에 나타나는 LVDT 센서의 형상을 별도로 추출하여 생성한 마스크를 적용함으로써 획득된 이진화 형상 이미지에서 불필요한 영역을 제거한다. 이러한 처리 과정은 추출된 데이터에서 불필요한 노이즈를 배제함으로써 목표 대상의 형상만을 측정하기 위함이다.

U²-Net 모델을 통해 인식된 물체의 형상에서 윤곽선을 추출한 후, 정확한 크기측정을 위해 모서리 위치를 서브픽셀 수준의 정밀도로 조정한다. Fig. 7은 OpenCV 라이브러리를 활용한 서브픽셀 수준의 모서리 조정 원리를 나타내고 있다[19]. 초기 모서리 위치를 $\vec{q}_0$ 라 하고, 이를 중심으로 설정된 특정 검색창 (Search Window) 내의 임의의 화소 위치를 $\vec{p}_i$ 라고 정의한다. 모서리의 최적 위치 $\vec{q}$ 와 화소 위치 $\vec{p}_i$ 를 연결하는 벡터는 $\vec{p}_i$ 지점에서의 이미지 밝기 변화량 $\vec{DI}_{p_i}$ 와 직교하는 성질을 가지고, 이를 수식으로 나타내면 두 벡터의 내적은 0이 되며, 오차 e_i 는 식(1)과 같이 정의된다.

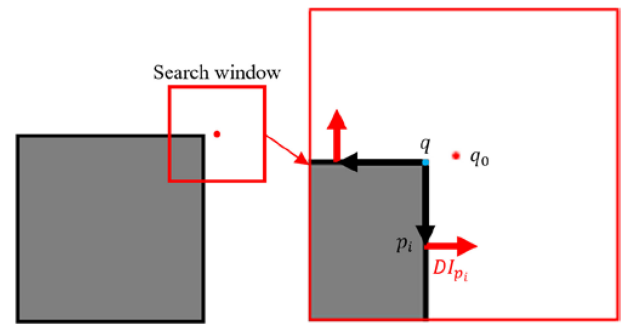


Fig. 7 Subpixel-level corner adjustment principles using OpenCV

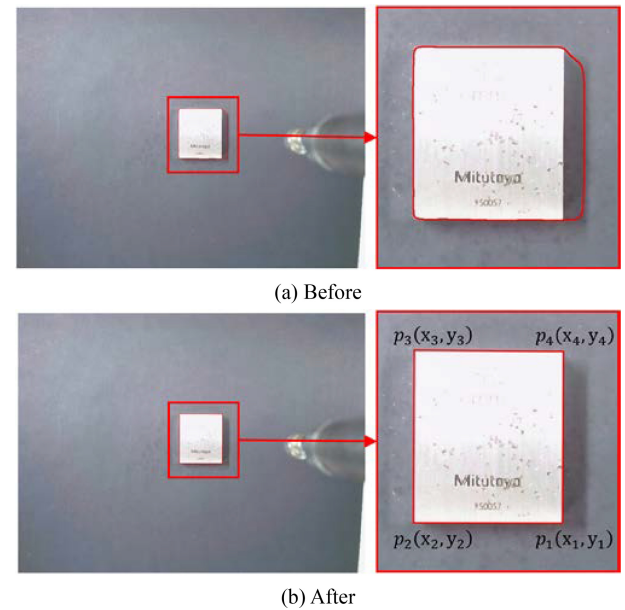


Fig. 8 Result of corner position adjusted with subpixel accuracy

$$e_i = \vec{DI}_{p_i}^T \cdot (\vec{q} - \vec{p}_i) \quad (1)$$

실제 환경에서는 이미지 노이즈로 인해 식(1)의 e_i 가 0이 되기 어려우므로 e_i 의 제곱합을 최소화하는 최적의 $\vec{q}$ 를 산출한다. 이를 위해 식(1)을 $\vec{q}$ 에 대해 편미분하여 그 값이 0이 되는 지점을 도출하며, 이를 수식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \vec{q}} \sum_i (e_i^2) = \sum_i (\vec{DI}_{p_i} \cdot \vec{DI}_{p_i}^T) \cdot \vec{q} - \sum_i (\vec{DI}_{p_i} \cdot \vec{DI}_{p_i}^T \cdot \vec{p}_i) \quad (2)$$

초기 모서리 위치인 $\vec{q}_0$ 에 따라 식(2)에서의 $\vec{q}$ 의 값이 변동성을 가지게 된다. 이러한 변동성으로 인한 오차를 최소화하고 최적의 위치로 수렴시키기 위해 식(2)에서 도출된 $\vec{q}$ 를 새로운 초기 위치 $\vec{q}_0$ 로 갱신하는 반복 계산을 수행하고, 이때 연산의 정지 조건으로는 위치 변화량이 0.001 px 미만이거나, 반복 횟수가 1,000회를 도달할 경우로 설정하였다.

Fig. 8은 서브픽셀 정확도로 조정된 모서리 위치의 결과를 나타내고 있고, Fig. 8(a)는 U²-Net 모델을 통해 인식된 형상의 윤곽선을 표시한 이미지이며, Fig. 8(b)는 OpenCV 라이브러리를

기반으로 식(2)의 반복 계산을 적용하여 Fig. 8(a)의 모서리 좌표를 서브픽셀 수준으로 조정한 결과이다. Fig. 8(b)에서 추출된 모서리 좌표는 이미지 좌표계를 기준으로 y축 값이 가장 큰(이미지 하단에 위치) 모서리를 $\vec{p}_1$ 로 지정하고, $\vec{p}_1$ 을 기준으로 시계방향으로 나머지 모서리를 정렬한다. 이렇게 정렬된 모서리를 기반으로 측정 대상의 가로 및 세로 화소수를 계산할 수 있고, 측정 오차를 최소화하기 위해 마주보는 두 변의 평균 길이를 산출하며, $\vec{p}_1$ 과 $\vec{p}_2$ 사이의 거리를 W_{pixel} , $\vec{p}_1$ 과 $\vec{p}_4$ 사이의 거리를 L_{pixel} 로 정의할 때, 각각을 구하는 식은 식(3) 및 식(4)와 같다.

$$W_{pixel} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}}{2} \quad (3)$$

$$L_{pixel} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2} + \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}{2} \quad (4)$$

시스템의 교정의 경우, 식(3)과 식(4)에서 계산된 가로 및 세로 화소수를 변환 없이 그대로 출력하고, 이것은 2D 비전시스템과 측정 대상 간의 거리 변화에 따른 이미지 내의 픽셀크기의 관계식을 유도하기 위함이다. 대상의 크기측정을 위한 경우, 화소수를 실제크기로 변환하는 과정을 포함하고, 교정 과정에서 유도한 화소크기 관계식이 필수적으로 요구된다. 거리측정센서를 통해 측정된 2D 비전시스템과 대상 간의 거리 H 를 관계식에 대입하면 이미지를 촬영한 높이에서의 화소크기 Δp 가 결정되고, 이것을 가로 및 세로 화소수와 곱하여 실제 물리적 크기 L 을 최종 산출한다.

3. 고정밀 로봇을 이용한 2D 비전시스템의 특성실험

3.1 고정밀 로봇의 최소 이동거리 측정실험

Table 1은 고정밀 로봇의 최소 이동거리 측정실험 결과를 나타내고 있다. 고정밀 로봇의 최소 이동거리 측정실험은 상하이동 모터에 724,000개의 펄스를 인가하여 볼스크류를 1회전시켰고, 분해능이 1 μm 인 디지털 인디케이터(ID-S12XB)를 이용하여 이동 전과 후의 값을 3번 반복 측정하였으며, 이동 전후의 위치값을 통해서 1회전에 따른 상하이동거리를 확인하였다. 측정된 이동거리를 1회전에 사용된 펄스수로 나누어 계산한 결과, 3번의 실험에서 최소 이동거리는 모두 0.007 μm 로 산출되었다. 따라서 고정밀 로봇의 최소 이동거리는 2D 비전시스템에 부착된 LVDT 센서의 분해능인 0.1 μm 보다 10배 이상 작으므로 정밀한 상하이동이 가능함을 확인하였다.

또한, 이동전과 이동후의 측정값의 차를 통해 감속기의 백래시를 판단할 수 있었고, 이것은 최대 9 μm 이었다. 고정밀 로봇의 최대 백래시는 2D 비전시스템의 교정에서 사용된 거리측정단위(mm)보다 1/100배 미만이므로 2D 비전시스템의 교정을 진행하는 데 문제없을 것으로 판단된다.

Table 1 Results of experiments measuring the minimum movement distance of a high precision robot

Test no.	Before position [μm]	After position [μm]	Moving distance [μm]	Min. moving distance [μm]
1	8	5,000	4,992	0.007
2	15	5,012	4,997	0.007
3	17	5,007	4,990	0.007



Fig. 9 Calibration image using block gauges by distance

3.2 2D 비전시스템의 교정

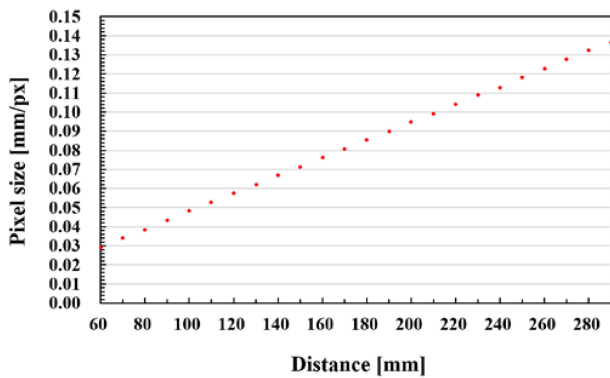
2D 비전시스템을 활용한 정밀한 크기측정을 위해선 2D 비전시스템과 대상 간의 측정 거리에 따른 화소크기의 관계를 파악하는 교정 과정이 필수적이다. Fig. 9는 블록게이지(BM1-32-1)를 활용한 거리별 교정 이미지를 나타내고 있고, 2D 비전시스템의 교정을 위한 실험은 30 × 35 mm 크기의 블록게이지를 교정을 위한 측정 대상으로 사용하였으며, 시스템의 교정을 목적으로 한 2D 비전시스템의 측정 알고리즘을 적용하였다. LVDT 센서를 통해 카메라와 대상물 간의 거리를 정밀하게 측정하였고, 측정 거리를 60–290 mm 구간에서 10 mm 간격으로 각 3회 반복 촬영하였다. 촬영한 이미지로부터 블록게이지의 가로 및 세로 화소수(W_{pixel} , H_{pixel})를 추출하였고, 화소수와 블록게이지의 실제크기(W , H)를 통해 각 측정 거리에서의 화소크기 Δp 를 산출하였다. Δp 를 계산하는 수식은 식(5)와 같다.

$$\Delta p = \left(\frac{W}{W_{pixel}} + \frac{L}{L_{pixel}} \right) \div 2 \quad (5)$$

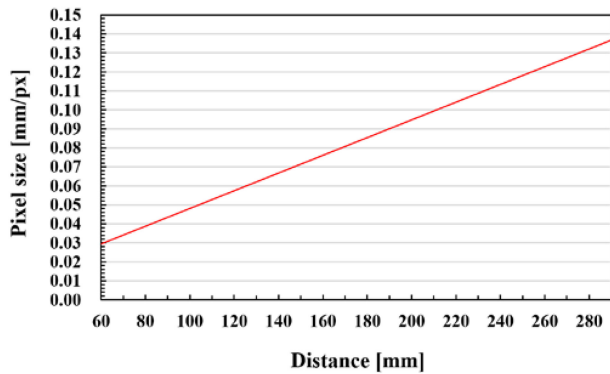
Fig. 10은 2D 비전시스템의 교정 결과를 나타내고 있고, Fig. 10(a)는 식(5)를 활용하여 거리별로 측정된 화소크기를 보여주고 있으며, 이를 통해 화소크기는 거리에 비례함을 확인하였다. 따라서 화소크기 Δp 는 측정 거리 H 에 대한 단순 선형 회귀식으로 나타낼 수 있고, 그에 대한 수식은 식(6)과 같다.

$$\Delta p = 0.001311478 + 0.000467076 \times H \quad (6)$$

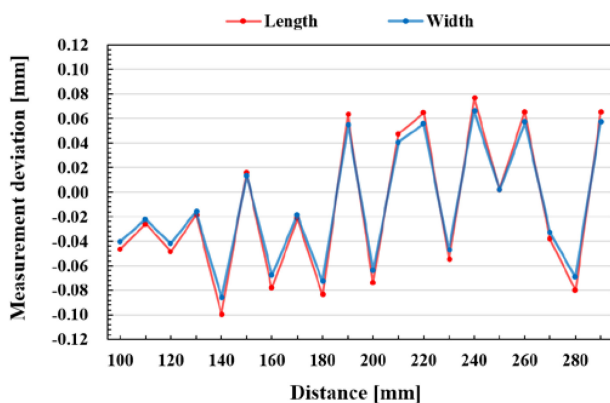
Fig. 10(b)는 거리별 화소크기에 대한 회귀식(6)을 그래프로 나타낸 것이고, Fig. 10(c)는 블록게이지 크기측정결과를 나타내고 있다. 식(6)을 적용하여 화소크기를 계산하였고, 이것을 식(3)과



(a) Measured pixel size by distance



(b) Linear regression of pixel size by distance



(c) Block gauge size measurement results using linear regression

Fig. 10 Calibration results of a 2D vision system

식(4)에서 계산한 가로 및 세로 화소수와 곱하여 블록게이지의 실제 크기를 산출하였다. 따라서 거리가 100–290 mm 구간에서 10 mm 간격으로 측정한 블록게이지의 크기 측정 결과, 편차는 ± 0.10 mm 이내였고, 해당 측정구간이 2D 비전시스템의 적합한 측정범위를 확인하였다.

3.3 2D비전시스템의 크기측정 실험

2D비전시스템의 교정을 수행한 후, 크기측정 정확도를 검증하고자 크기측정 실험을 진행하였다. Fig. 11은 크기측정 실험 대상을 나타내고 있고, 10–50 mm 크기의 10 mm 간격으로 된 다중 동심 정사각형 패턴을 사용하였으며, 이는 인쇄기(EM-C8100)를 활용하여 제작된 출력물을 사용하였다. 사용된 인쇄기의 사양은

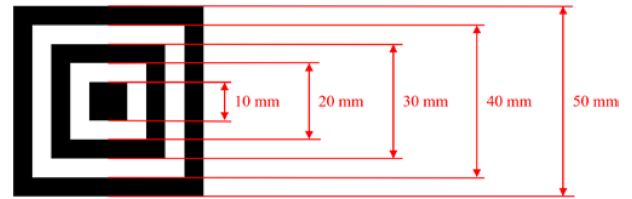
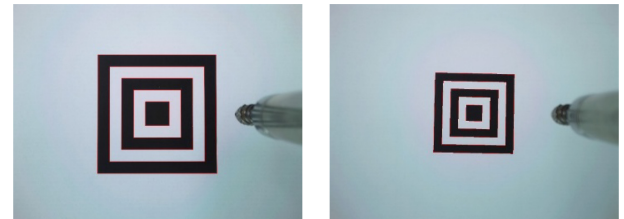
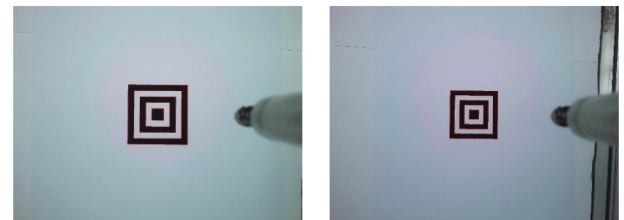


Fig. 11 Size measurement experimental object



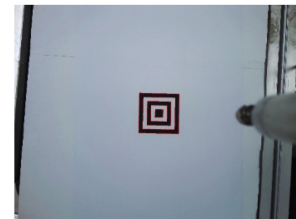
(a) 100 mm

(b) 150 mm



(c) 200 mm

(d) 250 mm



(e) 300 mm

Fig. 12 Measurement object images by distance

최대 출력 해상도가 $4,800 \times 1,200$ dpi (Dopts Per Inch)이므로 세로 해상도인 4,800 dpi를 기준으로 점 사이 간격은 0.005 mm, 가로 해상도인 1,200 dpi를 기준으로 점 사이 간격은 0.021 mm 이고, 따라서 프린터의 출력 오차는 최대 ± 0.021 mm이다.

Fig. 12는 거리별 측정 대상 이미지를 나타내고 있고, 이것은 대상의 크기측정을 목적으로 한 2D 비전시스템의 측정 알고리즘으로 인식된 코너를 표시한 이미지이며, LVDT 센서를 활용한 측정 거리가 60–290 mm 구간에서 50 mm 간격으로 촬영하였다. 이 이미지에서 2D 비전시스템의 측정 알고리즘을 적용하여 물체의 크기측정 결과를 도출할 수 있었고, LVDT 센서를 활용한 크기측정결과는 Fig. 13이며, 레이저센서를 활용한 크기측정결과는 Fig. 14이다. Figs. 13(a) 및 13(b)와 14(a) 및 14(b)는 크기측정 실험 대상의 가로와 세로에서의 오차를 나타내고 있다. LVDT 센서를 통해 크기측정을 진행한 결과, 측정거리가 100–300 mm 범위에서 LVDT 센서를 활용한 측정오차는 ± 0.55 mm, 레이저센서를 활용한 측정오차는 ± 1.10 mm로 나타났다. 특히,

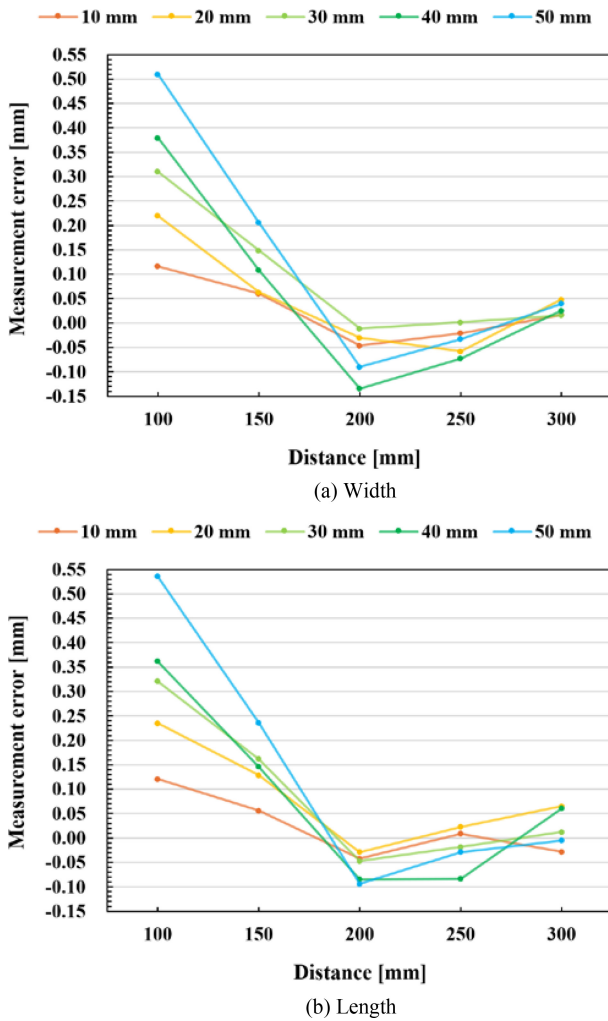


Fig. 13 Size measurement experiment results using LVDT sensor

측정거리가 250 mm인 지점에서 LVDT 센서를 통해 크기측정을 진행한 결과, ± 0.10 mm 이내의 오차가 나타났고, 레이저센서를 통해 크기측정을 진행한 결과, 같은 측정거리 지점에서 ± 0.20 mm 이내의 오차가 나타났으며, LVDT 센서를 활용했을 때 레이저 센서보다 약 1/2 수준의 오차로 측정됨을 확인하였다. 이는 LVDT 센서가 레이저센서보다 1,000배 정밀한 측정 분해능과 1/1,000 수준의 반복오차를 가지고 있어 거리측정의 오차를 최소화했기 때문으로 판단된다.

2D 비전시스템의 교정범위(60–290 mm)에서 10 mm 벗어난 300 mm 지점까지 크기측정을 진행한 결과, LVDT센서와 레이저 센서의 측정오차는 각각 ± 0.10 mm, ± 0.20 mm 이내로 나타났다. 이것은 200–250 mm 구간과 유사한 수준의 성능으로, 300 mm 구간에서도 측정 가능함을 보여준다.

각 센서별 크기측정의 최대오차는 측정거리가 100 mm인 지점에서 LVDT 센서의 경우 ± 0.55 mm 이내, 레이저센서의 경우 ± 1.10 mm 이내로 나타났다. 해당 측정거리에서 발생하는 측정오차가 타 측정거리보다 큰 원인은 측정 대상이 카메라와 가까워질수록 이미지 내에서 측정대상의 크기는 커지고,

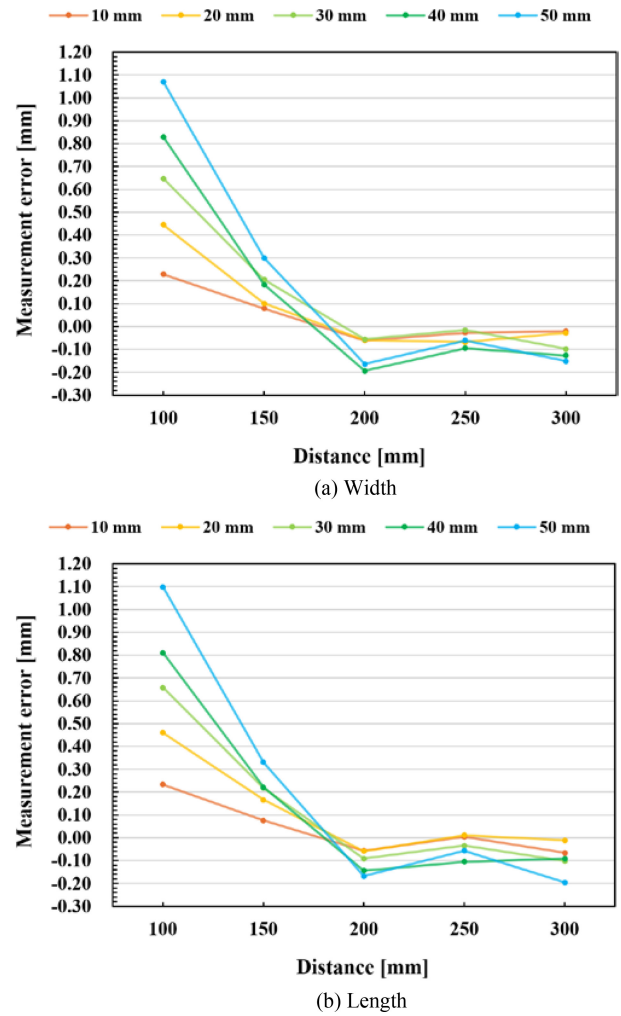


Fig. 14 Size measurement experiment results using laser sensor

이에 따라 측정대상은 왜곡 영향을 많이 받는 이미지의 가장 자리에 근접해진다. 이미지의 왜곡은 보정 과정을 거쳐도 완벽하게 제거하기 어렵고, 이미지의 중심부에서 멀어질수록 왜곡의 정도가 커진다. 따라서 측정 오차를 최소화하기 위해서는 측정 대상을 이미지 중심 영역에 위치시키는 최적의 거리를 맞추는 것이 중요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 2D 비전시스템의 교정 진행하기 위해 상하로 정밀하게 이동시킬 수 있는 고정밀 로봇의 기계장치를 제작하였고, 2D 비전시스템의 교정 및 크기측정 알고리즘을 개발하였다.

최소 이동거리가 0.007 μ m인 고정밀 로봇을 이용하여 2D 비전시스템의 교정을 진행한 결과, 측정 거리에 따른 화소크기를 비례적으로 나타낼 수 있었다. 이를 통해 교정에 사용한 블록체이지의 크기측정을 진행한 결과, 측정거리가 100–290 mm 구간에서 ± 0.10 mm의 크기측정 편차가 나타난 것을 확인하였다.

또한, 도출된 비례식을 바탕으로 거리 측정 센서별 크기 측정 실험을 진행하였다. 그 결과, 측정거리가 100–300 mm인 범위에서 LVDT 센서를 활용한 측정오차는 ± 0.55 mm, 레이저센서를 활용한 측정오차는 ± 1.10 mm의 결과가 나타났고, 측정거리가 250 mm인 지점에서 LVDT 센서를 활용했을 때는 ± 0.10 mm 이내의 오차를, 레이저센서를 활용했을 때는 동일 구간에서 ± 0.20 mm 이내의 오차를 보여주었다. 결과적으로 카메라와 레이저센서로 구성된 2D 비전시스템의 경우, 비용이 저렴한 대신 측정 오차가 비교적 높았고, 카메라와 LVDT 센서로 구성된 2D 비전시스템의 경우, 비용이 높은 대신 더 우수한 정밀도를 보여주었다.

따라서 물체 파지 등의 대상 크기 및 위치를 파악하고자 할 경우엔 레이저센서를, 조립, 분해 등의 더욱 정밀한 행동을 위해서는 LVDT 센서를 거리측정센서로 채택하는 방식으로 2D 비전시스템을 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 고해상도 카메라를 사용할 경우에는 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

추후 연구로는 본 2D 비전시스템을 로봇 및 자동화시스템에 적용하는 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 경상남도의 재원으로 경상남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-16-001). 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20241K00000010, SMR 로봇활용 제작지원센터 구축). 2026년도 산업통상자원부의 ‘인재양성사업’의 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

- ORBEC, Gemini 305 / 305g. <https://www.orbbec.com/gemini-305/>
- RealSense, D405. <https://www.realsenseai.com/products/stereo-depth-camera-d405/>
- Synexens, CS30 - RGBD depth camera with ToF technology for 3D and 2D image fusion. <https://support.tofsensors.com/product/CS30.html>
- Basler Product Documentation, Product specifications. <https://docs.baslerweb.com/product-specifications>
- StereoLabs, ZED X: Camera and SDK Overview. <https://cdn.sanity.io/files/s18ewfw4/staging/ec78a504b36ab95d6620ac720ffa5feaa2e8948b.pdf/ZED%20X%20Datasheet%20v1.2.pdf>
- TELEDYNE, Linea color 4k 13 kHz GigE. <https://www.teledynevisionsolutions.com/ko-kr/products/linea/?model=LA-GC-04K05B&vertical=tv-dalsa-oem&segment=tv>
- BASLER, Basler racer. <https://www.baslerweb.com/en-us/shop/rac8192-80km/>
- VIEWWORKS, VL series. https://vision.viewworks.com/kr/camera/line_scan/VL_series
- LUCID VISION LABS, Triton line scan 2k 60 kHz model. <https://thinklucid.com/product/triton-2k-dragster-linescan/>
- Emergent Vision Technologies, LB-16KG35: 25GigE line-scan camera with Gpixel GL3516. <https://emergentvisiontec.com/products/accel-lb-25gige-cameras-rdma-line-scan/accel-lb-16kg35/>
- FANUC, FANUC robot CRX series. <https://www.fkc.co.kr/content/ROBOT/%ED%98%91%EB%8F%99%EB%A1%9C%EB%B4%87>
- ABB, GoFa™ CRB 15000: Go far with your new helping hand. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A8564&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Universal Robots, UR series: Robot arm specification. https://www.universal-robots.com/manuals/EN/TechSheets/comparison_ur-series_pdf_online/comparison_UR%20Series_en.pdf
- Neuromeka, Indy. <https://www.neuromeka.com/indy>
- DOOSAN, P3020. <https://www.doosanrobotics.com/kr/product-solutions/product/p-series/p3020/>
- YASKAWA, GP series: GP50. https://www.yaskawa.eu.com/robotics/robots/handling-mounting/productdetail/product/gp50_701
- KUKA, KR 6 R1840-2. <https://my.kuka.com/s/product/kr-6-r18402/01tli000001VnNAAA0?language=ko&tab=Details>
- HD Hyundai Robotics, HDF4-5(HH4). <https://hd-hyundairobotics.com/biz/product/detail/1>
- OpenCV, cornerSubPix(). https://docs.opencv.org/4.x/dd/d1a/group_imgproc__feature.html#ga354e0d7c86d0d9da75de9b9701a9a87e



Min Ju Cho

M.Sc. candidate in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. Her research interest is vision system, industrial robot and intelligent robot.
E-mail: mj4494@naver.com

**Jin Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is smart factories and intelligent robot.

E-mail: rlawlsrbf@gmail.com

**Jeong Min Ha**

M.Sc. candidate in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is automated system and intelligent robot.

E-mail: gkwjdals99@naver.com

**Jae Yong Yoon**

M.Sc. candidate in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is autonomous mobile robots and AI vision.

E-mail: yon000722@naver.com

**Tae Bu Kim**

M.Sc. candidate in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is PCB design, 3D structural analysis and intelligent robot.

E-mail: durian5445@gmail.com

**Gab Soon Kim**

Professor in the Department of Control & Robot Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is walking aid robot and intelligent robot.

E-mail: gskim@gnu.ac.kr