

색상 분류 로봇팔

Color sorting robotic arm

장지민
Jang Jimin

Keyword: 컴퓨터 비전(Computer Vision), 로봇팔(Robot Arm), 역기구학(Inverse Kinematics), PID-제어(PID-Control)

ABSTRACT

The rapid growth of the modern logistics industry has heightened the importance of automated robots to reduce labor intensity and improve operational efficiency. This paper proposes a 4-DOF small-scale color sorting robotic arm system utilizing OpenCV-based image processing and inverse kinematics analysis. The ESP32-CAM captures the workspace, extracts object color and position coordinates through HSV color space analysis, and converts these into joint angles for the robotic arm using inverse kinematics algorithms, which are then transmitted to the Arduino. To ensure stable gripper operation, a parallel link gripper was designed, and a PID control algorithm was applied to minimize vibration during robotic arm movement. Experimental results confirmed the robotic arm successfully recognized objects of specific colors and accurately sorted them to designated locations. Ultimately, this work presents a foundational model for automated processes using a compact robotic arm and demonstrates the potential for performance enhancement through the introduction of advanced PID control and a 3D vision system.

1. 서론

1.1 로봇팔이란

국내 물류 산업은 익일배송, 새벽배송 등 신속한 배송 서비스를 중심으로 꾸준히 성장, 경쟁 중이다. 그러나 이런 서비스의 이면에는 고강도 노동과 인력 부족, 그리고 이에 따른 산업재해 위험이 뒤따른다.⁽¹⁾ 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 지치지 않고 정해진 작업을 정확히 수행할 수 있는 로봇 자동화 기술이 주목받고 있다. 특히 물류 이송, 하역 및 분류 공정을 로봇팔이 대체한다면 작업 효율성 증대는 물론 노동자의 안전 문제를 동시에 해결할 수 있을 것이다. 대표

적인 사례로, Boston Dynamics에서 컨테이너 화물 하역 로봇인 ‘스트레치(Stretch)’를 공개하였다. 이 로봇은 최대 22.6kg의 물건을 시간당 800개까지 옮길 수 있다.⁽²⁾ 실제로 Stretch를 도입한 Gap inc.는 도입 후 12~15명이 필요했던 작업이 1~2명 정도만 있어도 가능해졌고, 사람이 직접 개입하지 않아도 되니 안전성도 올라갔다.⁽³⁾ 산업용 로봇팔에는 수직 다관절 로봇, 수평 다관절 로봇, 병렬형 로봇, 직교 로봇 등이 있다. 그 중 수직 다관절 로봇, 혹은 N 자유도 로봇팔은 사람의 팔과 가장 유사한 관절 구조로 3차원 공간에서 다른 로봇보다 월등

히 자유롭고 유연한 움직임을 보인다. 주로 제품 적재, 용접, 도장, 조립, 제품 검사 등에 사용된다. 산업 현장에서는 효율적인 작업을 위해 최소 4자유도 이상의 로봇이 요구된다. 가장 많이 쓰이는 6자유도 로봇은 X, Y, Z와 Roll, Pitch, Yaw를 모두 제어 가능해 인간의 동작을 대부분 묘사할 수 있다. 그러나 복잡한 구조로 제어가 어렵고, 비용이 높다는 단점이 있다. 이에 비해 4자유도 로봇은 X, Y, Z와 Yaw의 제어가 가능하다. 6축 로봇보다 동작의 자유도는 다소 제한적이지만, Pick-and-Place와 같은 단순 작업에는 충분한 성능을 보여준다. 또한 구조가 단순해 제어 안정성이 높고 경제적이라는 장점이 있다.⁽⁴⁾ 따라서 본 연구에선 효율과 경제성을 고려해 물류 분류 작업에 적합한 4축 로봇팔을 설계하고 구현하고자 한다.

1.2 설계 중점 및 구현할 기능

설계에 중점 둘 부분은 로봇팔의 안정적인 구동과 정확한 움직임이다. 이를 위해 PID 제어의 개념을 사용하며 로봇의 움직임을 제어한다.

또한 OpenCV를 활용하여 물체의 색깔과 위치를 인식하고, 알맞은 상자에 물체를 넣는 로봇팔을 구현한다. 또한 로봇팔의 그리퍼는 기구학적 개념을 활용한 메커니즘을 적용한다.

2. 본론

2.1 로봇팔 조립

구매한 로봇팔을 조립하여 Fig. 1과 같이 완성하였다.



Figure 1. 로봇팔 초기 버전

2.2 로봇 그리퍼 설계

로봇 그리퍼 작동 방식은 평행 그리퍼(parallel gripper) 방식을 사용한다. 이 그리퍼는 핑거들이 일정한 축을 따라 서로 접근하고 떨어지는 동작으로 물체를 잡는 데 초점을 둔다. 특징으로는 구조가 비교적 간단하고, 적은 자유도로 제어가 쉽고 높은 반복 정밀도를 가지는 특징이 있다.⁽⁵⁾

그 후 기존에 장착돼있던 부품을 일부 이용해 기본 설계를 Fusion 360을 이용하여 Fig. 2와 같이 진행하였다.

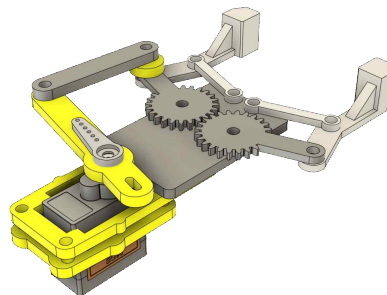


Figure 2. 그리퍼 설계

기구학의 4절 링크에서 약간의 변형을 하여 목표 물체를 원활히 집을 수 있도록 설계하였다.

그 후 3D프린터로 출력하여 기존 로봇팔에 장착하였다. 또한 기존에 장착돼있던 모터 SG90은 MG90으로 교체하여 더욱 견고하고 정확한 움직임이 가능해졌다. 최종 완성된 로봇팔은 Fig. 3과 같다.

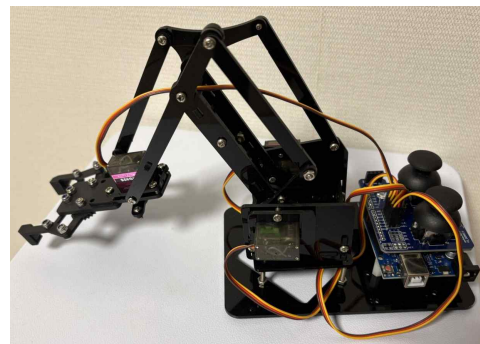


Figure 3. 최종 완료된 로봇팔
각 모터의 명칭은 Fig. 4와 같다.

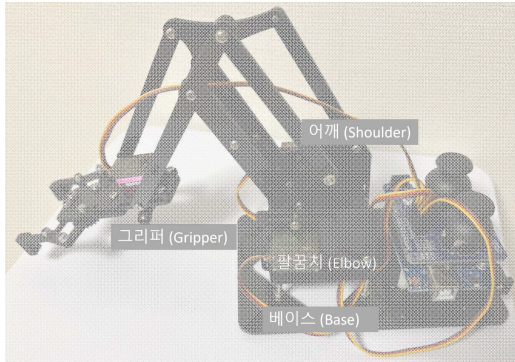


Figure 4. 각 모터의 명칭

2.3 로봇팔 테스트

조이스틱을 활용하여 직접 움직여보며 각 모터의 최대, 최소 각도를 출력하여 확인한다. 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. 모터의 최대, 최소 각도

모터	최솟값	최댓값
베이스	0	180
좌측	10	160
우측	10	120
그리퍼	0 (닫힘)	30 (열림)

2.4 물체 인식 알고리즘

우선 전체 메커니즘은 다음과 같다.

1. ESP32로 영상 촬영
2. 컴퓨터에서 영상 받아오기
3. 컴퓨터에서 opencv를 활용한 물체 인식
4. 인식된 물체의 색상, 좌표 파악
5. 파악된 좌표 로봇이 움직일 수 있는 각도 값으로 변경

6. 각도 값 로봇팔 전송, 동작

물체는 검은색, 녹색의 병뚜껑을 사용한다. 우선 ESP32는 Fig. 10과 같이 사선으로 바닥을 찍기 때문에 기울어진 바닥의 좌표를 평행한 바닥의 좌표로 변환해야 한다. 이를 위해 OpenCV에서 제공하는 findHomography() 함수를 이용한다. 이 함수는 Fig. 5의 왼쪽 그림과 같이 기울어진 사진을 평행하게 만들 수 있다.

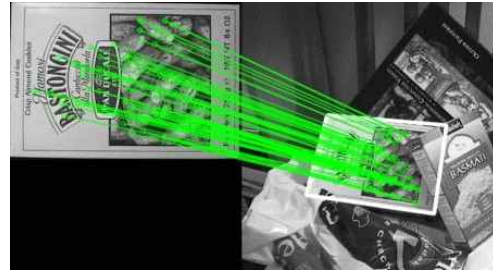


Figure 5. findHomography() 예제

또한 원본 이미지의 각 모서리 4개의 좌표를 주면 선형방정식을 거쳐 호모그래피 행렬을 얻을 수 있고, 기울어진 바닥의 좌표를 이 행렬과 곱하면 평행한 바닥 상에서의 좌표를 얻을 수 있다.

다음으로, 본격적으로 OpenCV를 활용하여 물체를 검출한다. 우선 ESP32-CAM으로부터 이미지를 읽어오고, 호모그래피 행렬을 불러와 계산 준비를 한다. 우선 이미지를 조명의 영향을 덜 받는 HSV 색공간으로 변환하고, 원하는 범위를 지정해 그 범위만 흰색으로 남기는 마스크를 만든다. 또한 감지 물체가 병뚜껑, 즉 원형이므로 원형도를 계산해 물체를 감지하고 감지된 물체의 색상과 좌표를 화면에 표시한다.

감지 결과는 Fig. 6과 같으며, 색상과 실제 좌표를 확인할 수 있다.

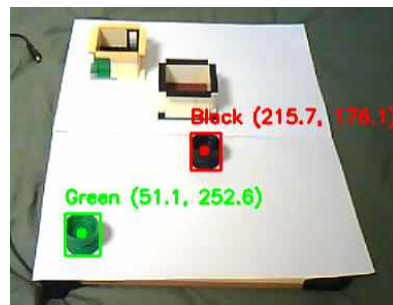


Figure 6. 색상 감지 결과

2.5 좌표 변환

그 후 카메라로 좌표를 받았을 때 로봇팔이 움직여야 할 좌표를 해석해야 하므로 역기구학을 적용하여 계산한다. 내가 사용하는 로봇의 링크 구조는 Fig. 7과 같다. L_1 의 길이는 82mm, L_2 의 길이는 81mm이다.

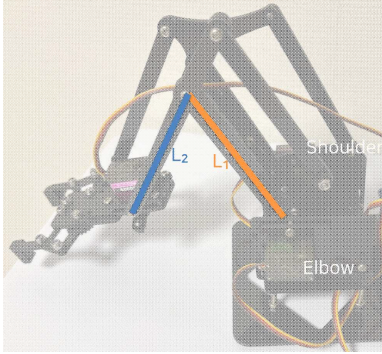


Figure 7. 링크 구조

또한 카메라에서는 x, y 좌표만 나왔지만, 실제로는 z 좌표까지 필요하다. 다만 ESP32-CAM으로 깊이까지 파악할 수는 없기에 이번 프로젝트에서 z값은 -30mm로 고정한다. 그 후 문제를 간단히 하기 위해 우선 베이스 모터의 각도부터 계산하자. 계산식은 다음과 같다.

$$\theta_{base} = \text{atan2}(y, x) \times \frac{180}{\pi}$$

이렇게 3차원에서의 문제를 2차원에서의 문제로 바꿀 수 있다.

그 후 어깨, 팔꿈치 모터의 각도를 구해내기 위해 로봇의 원점에서 물체까지의 거리 r_{dist} 를 구해야 한다. 계산식은 다음과 같다.

$$r_{dist} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

최종적으로 구해야 하는 각도는 L_1 , L_2 사이의 끼인각 & L_1 과 그리퍼 모터를 직선으로 이은 선분 $dist$, L_1 사이의 끼인각이다. 이 $dist$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$dist = \sqrt{r_{dist}^2 + z^2}$$

이렇게 Fig. 8과 같이 삼각형과 그 크기를 얻을 수 있다.

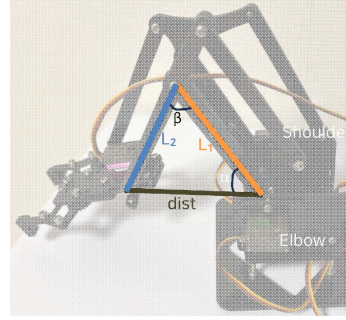


Figure 8. 각도 계산

α , β 는 최종적으로 나온 삼각형에서 제2 코사인법칙을 이용해 구하면 된다. 계산식은 다음과 같다.

$$\cos \alpha = \frac{L_1^2 + dist^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot dist}$$

$$\cos \beta = \frac{L_1^2 + L_2^2 - dist^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}$$

또한, 3차원 공간에 놓인 물체이므로 고도각 θ_{elev} 도 존재한다. 계산식은 다음과 같다.

$$\theta_{elev} = \text{atan2}(z, r_{dist})$$

최종적으로 구한 α , β , θ_{elev} 를 이용해 모든 모터의 각도를 다음과 같이 정할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\text{어깨 모터} = \theta_{elev} + \alpha$$

$$\text{팔꿈치 모터} = \beta$$

$$\text{베이스 모터} = \theta_{base}$$

$$\text{그리퍼 모터} = 0^\circ \text{ or } 30^\circ$$

마지막으로, 이 계산 과정은 내가 사용하는 로봇팔과 약간의 오차가 있다. 이 계산식은 팔꿈치 모터가 L_1 , L_2 가 만나는 점에 연결되어 있다고 가정한 상태이지만, 실제로는 여러 링크를 통해 연결되어 있기 때문이다. 이에 따라 초기 실행 시 계산된 값과 실제 값 간 비교하여 보정을 해주어야 정확하게 움직일 수 있다. 또한, $dist$ 가 L_1 , L_2 를 더한 값인 163mm보다 크면 물리적으로 접근 불가능하니 오류가 나게 해야 한다.

일련의 과정을 감지 결과와 같이 출력한 화면은 Fig. 9과 같다.

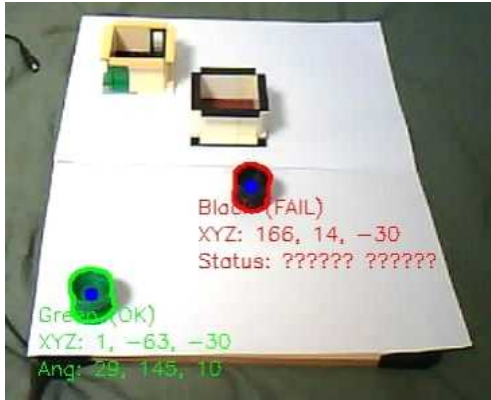


Figure 9. 감지 결과 및 역기구학 계산
녹색 물체는 정상적으로 베이스, 어깨, 팔꿈치 모터의 값을 출력했지만, 검은색 물체는 $dist = 163.865mm$ 가 나와 접근 불가능하여 결과값을 출력하지 못했다.

2.6 PID 제어

단순히 목표좌표를 모터에 전달하기만 하면 로봇의 움직임이 굉장히 불안정하고, 진동도 매우 심하다. 물체를 떨어뜨릴 수도 있고, 로봇팔의 내구성도 급격히 낮아질 것이다. 이를 위해선 각 동작이 부드럽게 이어져야 하고, 이는 PID 제어 알고리즘을 추가하는 것으로 해결할 수 있다.

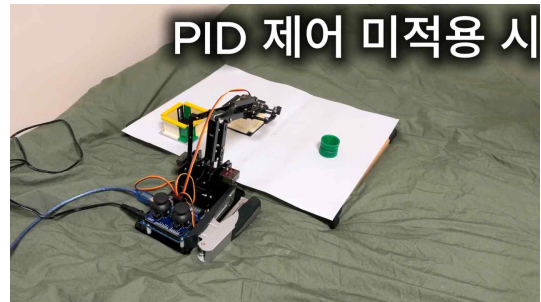
이번 작업에서는 P-제어만 추가하였다. P-제어만 추가해도 이번 작품과 같이 작은 모형에서는 충분히 부드러운 동작을 구현할 수 있을 것으로 생각했기 때문이다. 또한 P-제어는 로봇팔이 순간적으로 튀어 나가는 오버슈팅 문제가 전혀 없고, 아두이노의 통신 불안정으로 인한 모터 떨림 현상도 일어나지 않는다.

P-제어의 기본 계산식은 다음과 같다.

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

비례 게인 K_p 에 오차 $e(t)$ 를 곱해 이동량 $u(t)$ 를 얻으면 된다. 상세 계산 과정은 우선 K_p , 최대속도, 임계값, 제어 주기를 설정하고 각 움직임에서 목표 각도와 현재 각도의 오차를 계산한다. 이 오차로 $u(t)$ 를 구하고 이를 아두이노로 전송한다. 이때 $u(t)$ 는 최

대속도를 넘지 않도록 한다. 또한 $u(t)$ 가 너무 작은 경우, 다시 말해 목표값에 거의 도달했으면 목표값으로 강제로 고정해 잔떨림을 방지한다. 또한 너무 자주 제어하면 미세한 오차가 지속해서 나와 오히려 떨림이 증가할 수 있으니, 제어 주기를 설정해 이를 방지한다. 최종적으로 모든 관절이 목표에 도달하면 제어를 즉시 종료하고 다음 동작으로 넘어간다. Vid. 1은 P-제어를 적용 안 했을 때와 했을 때를 순차적으로 보여주는 영상이다.



Video 1. P-제어에 따른 모터 움직임 비교 영상, 링크: <https://youtu.be/UBmZeZ1M2i8>

P-제어를 적용했을 시 눈에 띄게 움직임이 부드러워지는 것을 알 수 있다. 다만, 처음 물체에 접근 시 로봇팔이 크게 떨리는 것을 확인할 수 있다.

2.7 최종 동작

작업환경은 Fig. 10과 같이 구성한다.

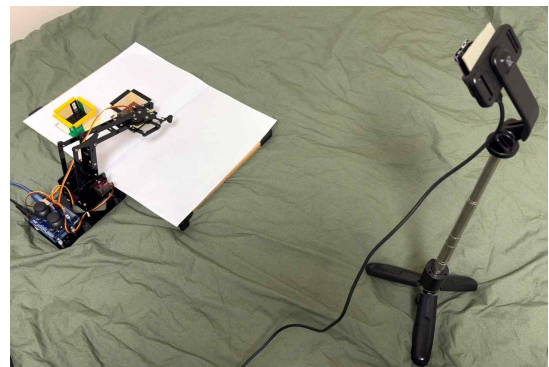


Figure 10. 작업환경
로봇팔이 활동할 수 있는 반경 위에는 인식이 수월하도록 흰 종이를 올려두고, 오른쪽

의 삼각대에 놓인 ESP32-CAM은 공간 전체를 찍을 수 있도록 사선으로 바라보도록 설정하였다.

또한 ESP32, PC, 아두이노의 통신 구조는 Fig. 11과 같다.

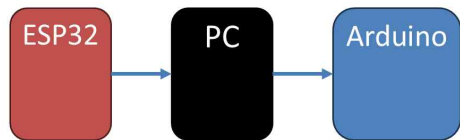
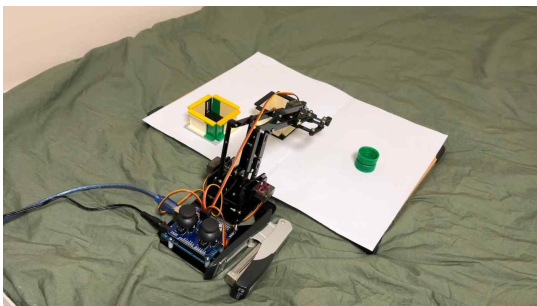


Figure 11. 통신 구조

ESP32는 PC로 이미지를 전송하고, PC는 이미지를 기반으로 물체 인식 및 각도를 계산하고 아두이노로 전송한다. 그 후 아두이노는 입력된 각도대로 동작을 진행한다.

로봇팔이 집을 물체는 검은색, 녹색 병뚜껑 2개를 각각 위아래로 붙인 물체를 사용한다. Fig. 10 기준 왼쪽 상자에 녹색, 오른쪽 상자에 검은색 물체를 분류한다. 최종 작동 영상은 Vid. 2와 같다.



Video 2. 최종 작동 영상, 링크: <https://youtu.be/9luquXxBqPA>

3. 결론

본 연구에서는 컴퓨터 비전(OpenCV) 기술과 4자유도(4-DOF) 로봇 팔을 결합한 소형 색상 분류 로봇 시스템을 설계하고 구현하여 물류 환경에서 자동화 및 인간 대체 가능성을 탐색했다. 우선 기구학 분석을 통해 4축 로봇팔의 역기구학 공식을 도출했다. 이를 통해 ESP32-CAM에서 획득한 2차원 평면 좌표를 로봇 팔의 3차원 관절 각도로 변환하는 알고리즘을 성공적으로 구현했다. 특히, 이미지 처리 과정에서 호모그래피 변환을 적

용하여 카메라 기울기로 인한 왜곡을 보정하여 좌표 인식 정확도를 향상시켰다. 또한, 4절 링크를 응용한 그리퍼 구조를 이용하여 로봇팔의 엔드이펙터를 설계 및 제작해 원형 물체를 안정적으로 잡을 수 있는 기계적 메커니즘을 구현했다. 또한 실험 결과를 통해 녹색 및 검은색 물체의 성공적인 인식 및 분류, 그리고 물체를 지정된 위치로 성공적으로 운반할 수 있음을 확인했다. 마지막으로, 로봇팔의 동작을 제어하기 위해 단순 위치 제어 대신 P-제어 기법을 채택했다. 이 기법은 목표 위치 도달 시 발생할 수 있는 갑작스러운 움직임을 완화하고 동작의 연속성과 안정성을 향상시켰다.

그러나 본 연구는 다음과 같은 한계점을 가지고 있으며, 이는 향후 연구에서 해결되어야 한다. 첫째, 단안 카메라인 ESP32-CAM을 사용했기 때문에 물체 깊이 정보를 실시간으로 획득하는 데 한계가 있어 고정된 높이 값($Z=30\text{mm}$)이 필요했다. 향후 RGB-D 카메라 또는 스테레오 비전 기술을 구현하면 다양한 높이의 물체를 유연하게 처리할 수 있을 것이다. 또한, 초기 동작 시 발생하는 미세한 흔들림을 P-제어만으로는 완전히 제거할 수 없었다. 이는 PID 제어기에 I(적분), D(미분)-제어를 추가하여 시스템의 정밀도와 응답 특성을 더욱 향상시킴으로써 해결할 수 있다.

결론적으로, 이 연구는 저렴한 하드웨어와 오픈소스 라이브러리를 사용하여 실시간 색상 분류 자동화 시스템을 구현함으로써 소규모 제조 및 물류 프로세스에서 로봇팔의 잠재력을 보여준다.

참고 문헌

- (1) 백남주, 「빠른 배송은 정말 우리 삶을 편리하게 만들까?」, 『오마이뉴스』, 25.07.31, <https://omn.kr/2erhu> (접속일 25.04.19)
- (2) 이상규, 「극한직업`상하차 알바 ... 로봇 투입 가속도」, 『매일경제』, 22.02.09,

<https://www.mk.co.kr/news/business/10211498> (접속일 25.04.19)

- (3) Boston Dynamics, 「Stretch Helps Gap Inc. Deliver for Its Customers」, 『Boston Dynamics』, 22.02.09, <https://bostondynamics.com/case-studies/stretch-helps-gap-inc-deliver-for-its-customers/> (접속일 25.04.19)
- (4) 로봇신문사, 「로봇 말해주는 남자, 로말남 1편 - 산업용 로봇의 종류와 특징」, 『로봇신문』, 21.04.08, <https://www.irobotnews.com/news/articleView.html?idxno=24488> (접속일 25.05.04)
- (5) 김기성, 김한성, 「적응형 그리퍼 설계 연구」, 한국산업융합학회 논문집, 제22권 제3호, 2019년, pp. 325-335
- (6) 김준희, 손승제, 김동환, 「재활 치료와 자세 측정을 위한 모션 플랫폼 운동기기 개발」, 대한기계학회 논문집, A권 제42권 제12호, 2019년, pp. 325-335