

AI 모방학습 및 ROS2를 활용한 Master-Slave 로봇 기반 지능형 검사 시스템

박승표*, 권정우*, 최민지*, 류현우*, 윤주일*†

*한성대학교 기계전자공학부

†e-mail:juilyoon@hansung.ac.kr

An Intelligent Inspection System based on a Master-Slave Robot utilizing AI Imitation Learning and ROS2

Seung-Pyo Park*, Jung-Woo Kwon*, Min-Ji Choi*, Hyeon-Woo Ryu*, Juil Yoon*

*School of Mechanical and Electronic Engineering, Hansung Univ.

요약

현재 제조업에서 자동화 검사 시스템의 필요성이 점차 커지고 있다. 그러나 기존 로봇 시스템은 복잡한 프로그래밍과 전문가의 지식을 요구해 비전문가의 접근이 어렵다. 본 연구는 이 문제를 해결하고자 비전문가도 쉽게 활용할 수 있는 지능형 로봇 자동화 검사 시스템을 제안한다.

제안 시스템은 비동형 마스터-슬레이브 구조를 기반으로, 사용자가 원격으로 로봇을 제어하며 데이터를 수집한다. 이 데이터는 행동 복제 기반 모방학습에 활용되어 로봇이 특정 작업을 자동으로 수행하도록 학습시킨다. 특히, 스카라 로봇이 파지한 물체를 다각도로 촬영하고 OpenCV 기반 외곽선 분석을 통해 사출물 불량률을 판별한다.

실험 결과, 제안 시스템은 약 85%의 자동화 성공률과 약 90%의 불량 검출 정확도를 달성했다. 이는 적은 수의 시연만으로도 복잡한 작업을 자동화할 수 있음을 보여준다. 향후 연구에서는 능동적 학습 기법을 접목해 모델의 강건성을 더욱 향상할 계획이다.

1. 서론

최근 정밀 조립 등 다양한 산업 분야에서 원격 제어 로봇 시스템의 도입이 되고 있다. 이러한 시스템은 작업자가 접근하기 어려운 환경에서도 정밀한 조작을 가능하게 하지만, 전통적인 로봇 프로그래밍 방식은 비전문가가 신속하게 적용하기 어렵다는 본질적인 한계가 있다. 이에 대한 대안으로 모방학습(Imitation Learning)이 부상하고 있으며, 특히 전문가의 '상태-행동' 데이터를 직접 모방하는 행동 복제(Behavioral Cloning)는 복잡한 프로그래밍 없이 로봇 자동화를 할 수 있는 강력한 기법이다.

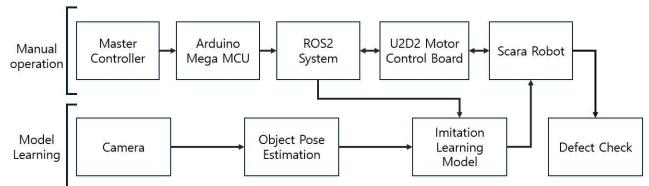
관련 선행 연구로서, Fang과 Li는 다수의 시연 데이터를 활용해 효율적인 디중 로봇 협동 정책을 학습하는 아키텍처를 비교 분석하였다[1]. Mandlekar 등은 학습된 정책의 실패 구간에 인간이 개입하여 데이터를 보강함으로써 안정성과 성능을 점진적으로 향상하는 방법을 제시하였다[2]. 그리고 Kim 등은 Self-Attention 기반의 Transformer 구조를 도입하여 복잡한 디중 팔 조작 환경에서 학습 효율을 크게 개선하였다[3].

본 연구는 이러한 선행 연구를 토대로, 비동형(Non-isomorphic) 마스터-슬레이브 환경을 구축하여 작업자가 로봇을 수동으로 제어한 시연 데이터를 행동 복제 기반 모방학습 알고리즘의 학습에 활용하여, 목표 물체의 불량률을 검사하는 정밀 작업을

로봇이 성공적으로 수행하도록 하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시스템 아키텍처



[그림 1] Block diagram of the Master-Slave Robot system

본 연구에서 제안하는 시스템은 마스터/슬레이브 디바이스, 그리고 처리 시스템은 그림[1]으로 나타낼 수 있다. 로봇 운영체제의 경우 ROS 2 Humble을 기반으로 제어된다. 그 외의 각 장치의 특징은 다음과 같다.

- 1) 마스터 디바이스 (Master Device): 사용자가 손으로 잡고 로봇을 제어하는 장치이다. 해당 장치를 통해 손의 위치/자세 정보를 파악하고 이를 처리 시스템에 전송한다.
- 2) 슬레이브 디바이스 (Slave Device): 맞춤 설계된 5-DOF 스카라 로봇이다. 로봇의 앤드 이펙터에는 석션 그리퍼(Suction Gripper)가 장착되어 다양한 물체가 파지 가능하다.

3) 처리 시스템 (Processing System): 로봇 기구학을 계산하고, 제어 신호를 생성하며, 모방학습을 위해 카메라를 통한 객체 자세 추정 및 모방학습 모델 학습을 처리한다.

2.1.1 모방학습 알고리즘

행동 복제는 전문가의 시연 데이터를 기반으로 로봇의 제어 정책 π 를 학습하는 과정이며, 1) 전문가 데이터 수집, 2) 정책 신경망 모델 학습, 3) 학습된 정책 기반 자동화 실행의 단계로 구성되어 있다. 각각의 과정에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

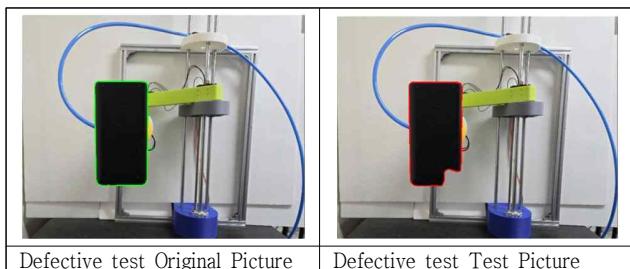
1) 전문가 데이터 수집: 작업자가 스카라 로봇을 제어하며 특정 동작을 반복한다. 이 과정에서 시스템은 특정 시점 t 의 상태 (s_t) 와 그에 해당하는 작업자의 행동 (a_t) 을 하나의 쌍 (s_t, a_t) 으로 저장한다.

2) 정책 신경망 모델 학습: 수집된 데이터를 이용하여 지도학습을 진행한다. 상태 s_t 를 입력받아 행동 a_t 를 출력하도록 하는 정책 신경망 $\pi_\theta(s_t) \rightarrow a_t$ 를 학습시킨다.

3) 학습된 정책 기반 자동화 실행: 학습된 모델 π_θ 를 슬레이브 로봇에 탑재하여 로봇은 현재 자신의 상태 s_t 를 모델에 입력하고, 출력된 행동 s_t 를 따라 다음 동작을 수행한다.

2.1.2 불량 검사 알고리즘

모방학습으로 학습된 로봇은 전문가의 ‘파지-회전-제시’ 궤적을 재현하여, 제품 6면의 이미지를 일관된 조건으로 수집하며, 수집된 이미지를 통한 불량 판별은 형태적 불량을 검출하는 데 초점을 맞추어, 외곽선(Contour) 분석을 핵심 알고리즘으로 사용한다. 구체적인 판별 절차는 1) 이미지 외곽선 추출, 2) 정상 데이터와 비교, 3) 불량 판정의 과정으로 구성된다.



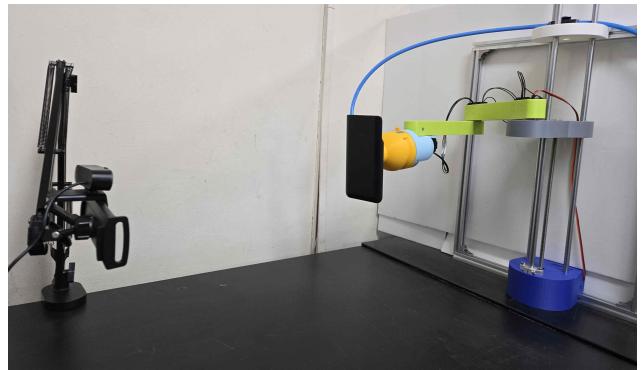
[그림 2] Object defective test result

2.2 Master-Slave 스카라 로봇

본 연구에 활용된 Master-Slave 시스템은 맞춤 설계된 5자유도(5-DOF) 스카라(SCARA) 구조의 로봇팔이다[그림3]. 이 로봇은 마스터 디바이스를 통해 제어되며, 사용자의 동작을 모방하여 정밀한 작업을 수행하게 설계하였다.

실제로 로봇의 앤드 이펙터(end-effector)에는 흡입식 그리퍼(Suction Gripper)가 장착되어 있어 다양한 형태의 물체를 안정적으로 파지할 수 있다. 로봇은 파지한 물체를 회전시키고 제시함

으로써, 각각도에서 물체의 6면 이미지를 촬영한다. 이 과정에서 얻은 이미지 데이터는 시출물의 형태적 불량을 검출하는 데 사용된다. 이러한 기능은 불량률 검사를 위한 일관된 이미지 데이터 확보를 가능하게 한다.



[그림 3] A custom-designed 5-DOF SCARA-structured robot system

3. 실험 및 평가

본 연구의 유효성을 검증하기 위해 다음의 실험을 수행했다. 1) 로봇 시스템 성능 검증: 시스템의 기본 성능을 확인하기 위해 로봇의 위치 및 자세 추정 오차와 제어 지연 속도를 측정했다. 측정 결과, 컨트롤러의 상대 위치/자세 오차는 목표 기준인 $\pm 10\text{mm}$, $\pm 5\%$ 이내인 $\pm 9.2\text{mm}$, $\pm 4.3\%$ 로 나타났다. 제어 지연 속도 또한 목표 기준인 200ms보다 빠른 125ms를 기록하여, 시스템의 안정적인 작동이 가능하다는 것을 확인했다.

2) 데이터 수집: “사출물 다각도 촬영” 시나리오를 바탕으로 전문가 시연 데이터를 100회 이상 수집했다. 이는 모방학습 모델의 기초 자료로 활용된다.

3) 모방학습 적용 및 평가: 수집된 데이터를 바탕으로 모델을 학습하고, 검증 데이터 셋을 통해 최적의 모델을 선정했다. 최종적으로 약 85%의 반복 동작 재현율을 달성했다. 이는 목표 기준인 90%에는 약간 미치지 못하지만, 적은 시연 데이터만으로 복잡한 작업을 자동화할 수 있음을 보여주는 유의미한 결과이다.

4. 결론

본 연구는 직관적인 마스터–슬레이브 제어와 행동 복제를 결합하여, 비전문가도 쉽게 사용할 수 있는 지능형 로봇 자동화 불량 검사 시스템을 구현했다. 실험 결과, 개발된 시스템은 약 85%의 작업 성공률과 90%의 불량 검출 정확도를 달성하여, 적은 시연 데이터만으로도 복합적인 자동화가 가능함을 입증했다. 특히, 오픈소스 기반의 본 시스템은 중소 제조 현장에 실용적인 저비용 자동화 솔루션의 가능성을 제시했다는 점에서 의의가 있다. 향후 DAgger와 같은 능동적 학습 기법을 도입하여 모델의 강건성을 향상하면, 더욱 다양한 산업 현장에서 신뢰성 높은 솔루션으로 활용될 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Fang, J., Li, W., Learning Multi-Arm Manipulation Through Collaborative Teleoperation, International Journal of Robotics Research, 2020.
- [2] Mandlekar, S., et al., Human-in-the-Loop Imitation Learning using Remote Teleoperation, arXiv preprint arXiv:2012.06733, 2020.
- [3] Kim, Y., Ohmura, Y., Kuniyoshi, Y., Transformer-based Deep Imitation Learning for Dual-Arm Robot Manipulation, arXiv preprint arXiv:2108.00385, 2021.