제조+AI로 실현되는 미래상: 자율공장

Autonomous Factory: Future Shape Realized by Manufacturing + AI

손지연 (J.Y. Son, jyson@etri.re.kr) 지능·제조융합연구실 책임연구원/실장
김현 (H. Kim, hyunkim@etri.re.kr) 지능·제조융합연구실 책임연구원
이은서 (E.S. Lee, eslee@etri.re.kr) 지능·제조융합연구실 책임연구원/기술총괄
박준희 (J.H. Park, juni@etri.re.kr) 산업·IoT지능화연구단 책임연구원/단장

ABSTRACT

The future society will be changed through an artificial intelligence (AI) based intelligent revolution. To prepare for the future and strengthen industrial competitiveness, countries around the world are implementing various policies and strategies to utilize AI in the manufacturing industry, which is the basis of the national economy. Manufacturing AI technology should ensure accuracy and reliability in industry and should be explainable, unlike general-purpose AI that targets human intelligence. This paper presents the future shape of the "autonomous factory" through the convergence of manufacturing and AI. In addition, it examines technological issues and research status to realize the autonomous factory during the stages of recognition, planning, execution, and control of manufacturing work.

KEYWORDS 자율공장, 제조 AI, 개인맞춤제조, 로봇작업환경인지, 자율작업계획, 분산협업지능

Ⅰ. 서론

제조는 우리 생활의 기반이 되는 모든 유형(有形)의 제품들을 생산하는 활동으로, 하나의 제품이 기획되어서 설계, 생산, 유통을 거쳐 소비자에게 전달되는 일련의 과정을 통칭한다.

공장은 이러한 제조 과정에서의 생산을 담당하는 곳으로, 19세기 이후 2, 3차 산업혁명을 거치면서 대량생산과 생산 자동화를 통해 생산성을 극대화하는 방향으로 발전해 왔다. 이는 생산자에 의해 만들어진 규격화된 제품을 소비자가 일방적으로 소비하는 형태, 즉 공급자 주도의 시장을 형성하면서 오늘날까지 이어져 오고 있다.

그러나 15년 후의 미래 생산과 소비 형태는 어떻게 변해 있을까? 미국 코렌 미시건대 교수가 저술한 저서 〈글로벌 제조 혁명〉에 따르면, 제조 패러

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360107
* This work was supported by Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) grant funded by the Korean government. [Core Technologies of Distributed Intelligence Things for solving Industry and Society Problems].

OPEN 공공누리 출처표시 상업용금지 변경금지 공공저작물 자유이용허락
본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2021 한국전자통신연구원

다임은 대량생산(Mass Production)과 대량맞춤 생산(Mass Customization) 시대를 거쳐 개인화된 제품을 생산(Personalized Production)하는 시대로 변화될 것으로 전망하고 있다[1]. 이러한 변화의 흐름은 이미 가시화되고 있는데, 소비자들의 기호가 다양해지면서 생산주기는 점점 단축되고 있고, 신제품 출시 빈도는 증가하는 현상으로 나타나고 있다.

이러한 흐름은 생산과 소비의 혁명적 변화를 가져올 것으로 예측된다[2]. 미래 소비자는 제품의 콘셉트 설계에서부터 생산 과정에 직접 개입하고, 공장은 이러한 소비자 니즈를 반영하여 개별화된 제품을 효율적으로 생산할 수 있는 체계로 전환될 것이다[3,4].

본 고에서는 이러한 소비자들의 개인화된 니즈와 가치를 반영한 제품을 생산하는 미래 공장을 형상화하여 제시하고, AI 융합을 통해 해결할 기술 요소들을 도출, 기술적 이슈 및 관련 연구를 소개한다.

본 고의 구성은 Ⅱ장에서 제조 미래 형상인 자율공장의 개념을 제시하고, Ⅲ장에서는 형상의 발전 방향을 전망한다. Ⅳ장에서는 신개념 형상으로부터 핵심 기술을 도출하여 기술별 연구동향, 미래 형상 실현을 위한 기술적 이슈들을 설명한다. 마지막으로 Ⅴ장에서는 미래상 제시를 통한 기대 효과를 기술한다.

Ⅱ. 자율공장의 개념

소비자의 다양한 요구사항을 수용하고, 설비 고장, 주문량 변화, 불량률 증가 등 생산 현장에서 발생할 수 있는 다양한 불확실성을 해결하기 위한 고도화된 유연 생산 기술은 아직 시작 단계라 볼 수 있으며, 자율공장은 유연 생산 기술의 궁극적인 형태로 인공지능을 갖춘 제조설비 및 로봇들이 협력하여 조립, 운반, 포장, 검사 등 제품생산과 관련된 작업을 자율적으로 수행하고, 필요할 때 인간과 함께 일을 할 수 있는 인공지능 기반의 미래 생산 환경으로 정의할 수 있다.

하나의 제품생산을 위해서는 부품 및 원자재 가공, 조립, 이송, 포장, 검사 등 여러 공정을 필요로 하고, 각 공정에는 여러 설비와 작업자들이 할당되어 있으며, 각 설비에는 생산을 위한 설비 셋업, 부품 교체, 작업 교시 등 여러 작업들이 할당되어 있다. 단일 제품생산 시에는 제품생산에 필요한 공정들이 이미 고정되어 있고, 고정된 공정 계획 안에서 설비와 작업자들을 효율적으로 활용하기 위해 현장 관리자들은 본인들이 보유한 현장 경험 및 도메인 지식을 기반으로 최적화를 수행한다.

생산해야 하는 제품 및 옵션이 다양해지고, 주문량조차도 가변적일 것으로 예측되는 미래 제조 환경에서는 동적으로 작업계획, 라인 구성, 설비 세팅, 설비 교체, 작업 지시 등을 실시간으로 최적화하여 갱신해 줄 수 있어야 해서[5,6] 새로운 지능의 도움이 필요할 수밖에 없다. 따라서 자율공장의 의의는 단순히 사람이 개입하지 않는 자동화 설비 중심의 공장 자동화의 의미보다는 다양한 옵션의 제품들을 생산해야 하는 환경에서 발생할 수 있는 인간이 해결하기 어려운 문제점들을 인공지능이 스스로 해결한다는 데에 있다.

즉, 자율공장은 대량생산을 위한 단순 반복작업이 아닌 생산의 유연성을 극대화할 수 있는 지능형 제조 환경으로서, 제조설비들이 제품의 생산방법을 학습하고, 다른 설비 혹은 인간과 협력하며, 주문·설계·생산·유통물류의 전 과정에 대한 계획을 스스로 수립, 실행할 수 있는 생산 환경을 의미한다.

Ⅲ. 발전 방향

미래 자율공장은 현장에 존재하는 다양한 제조

설비들이 자신이 해야 할 작업을 인지하고, 작업을 어떻게 수행해야 할지를 스스로 계획하며, 계획된 작업을 수행하는 지능형 생산 환경으로, 현재의 제조 환경을 혁신적으로 변화시키기 위한 지능형 자율 협업 설비, 예측적 자율 계획, 분산 협업 실행 및 제어 등 여러 요소기술들에 관한 연구가 단계적으로 활발히 진행되고 있다[7–10].

특히 제조설비 관점에서는 과거 인간의 노동력을 단순 대체했던 설비들이 현재 작업자와 협업 가능한 협동 설비 형태로 발전하는 추세이며, 미래에는 인공지능을 갖춘 로봇인 휴머노이드도 생산 현장에 활용될 것으로 예상한다. 즉, 미래 산업 설비들은 단순 반복 작업을 하는 것이 아니라 비정형화된 작업환경 안에서 복잡한 작업에 대해 스스로 학습을 통해 작업 처리 방식이나 내용을 바꾸는 능력을 갖추게 됨을 의미한다. 이러한 지능형 산업 설비들은 일반 제조 현장에서 인간을 도와 동료의 일원으로 일을 할 뿐만 아니라, 인간의 두뇌로 수행하기 어려운 또는 인간이 물리적으로 수행하기 어려운 작업들을 중심으로 생산현장에 활용될 것이며, 이를 5년 단위 형상으로 제시하면 다음과 같다.

- **1단계: AI 협업로봇(2025년)**

생산지시서, 작업 매뉴얼을 이해하고, 작업 현장의 상황을 인식하여, 작업계획과 실행을 판단하여 사람 개입 없이 로봇과 로봇이 협력하여 제품을 조립, 가공하는 기술

- **2단계: AI 작업공간(2030년)**

인간 작업자의 움직임을 인식하고 작업 의도를 예측하여 지시하지 않아도 스스로 업무를 도와주는 다수의 협동형 로봇이 사람과 자연스럽게 소통하며 운용되며, 학습된 모델이 다른 작업 현장에 전이되어도 스스로 최적화해가는 기술

- **3단계: 자율공장(2035년)**

사람과 소통하며 지시에 따라 제품 디자인, 설계, 시뮬레이션을 수행하고, 디지털 트윈을 기반으로 최적의 공정을 계획하고 수행할 뿐만 아니라 지능형 제조설비들의 협업을 통해 물류조달–생산–가공–검증 등 생산 전 주기를 포괄하는 최적의 생산 프로세스를 자율적으로 제어하는 기술

Ⅳ. 핵심 기술

자율공장 실현을 위해서는 무선통신, 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능, CPS(Cyber Physical System) 등의 첨단 ICT 기술이 핵심 기술로 요구된다. 본고에서는 인공지능 관점에서 기술들을 소개한다.

제조 AI는 AI 기술을 제조에 적용하는 것으로서 사람의 지능을 대상으로 하는 범용 AI와는 달리 산업에서의 풀기 어려운 문제를 대상으로 하고 있다.

제조에 AI가 적용되기 위해 가장 중요한 기반은 데이터이다. 제조에서 다루는 데이터는 센서가 뱉어내는 대규모의 데이터가 실시간으로 들어오며, 이들 데이터는 부정확할 수 있는 특성을 갖는다. 극한 환경 때문에, 또는 사람의 잘못된 조작 때문에, 또는 센서의 불량 때문에, 심지어는 센서에 달라붙은 벌레 때문에 데이터가 왜곡될 수 있다. 이러한 왜곡된 데이터로부터 좋은 학습 결과를 기대하기는 어려우므로 실시간 대용량의 데이터 전처리는 매우 중요한 문제가 된다.

게다가 데이터 자체의 불균형 문제가 있다. 대부

분 제조에서 AI를 이용해 불량을 알고 싶고, 고장을 알고 싶고, 이상 상황을 예측하고 싶어 한다. 하지만, 이러한 데이터는 수없이 들어오는 데이터 중 극히 일부에 불과하므로 이것을 알아내기 위한 기계학습에 필요한 데이터는 턱없이 부족할 수밖에 없다. 따라서 적은 데이터로 어떻게 효과적인 학습을 하는지가 제조 AI에서는 매우 중요한 문제가 된다.

제조 AI에서 중요한 또 다른 이슈는 정확성과 신뢰성 문제이다. 범용 AI와 달리 제조 AI에서 잘못된 판단은 공장을 멈추거나 큰 재난으로 이어질 수 있어서 하나의 모델로 판단하기에는 위험하다. 따라서 많은 알고리즘을 동시에 활용하고, 이 결과를 조합하는 앙상블 방법이 필요하다. 물론 그만큼의 큰 비용과 시간을 요구하게 된다.

제조 AI에서의 또 다른 중요한 이슈 중의 하나는 설명 가능한 AI이다. 제조에서 AI를 적용했을 때 이 AI가 왜 이렇게 인지했고, 판단했는지를 설명할 수 있어야 한다. 문제가 발생했을 때 왜 이런 결과가 나왔는지 이것을 어떻게 고쳐야 하는지도 모르고 AI를 적용하기는 너무 위험이 크기 때문이다. 기계학습이 블랙박스가 되어서는 실제 제조 분야 적용에 한계를 가질 수밖에 없다.

이러한 문제들 대부분이 현재 AI가 가진 문제이며, 아직 해결이 어렵고 더 많은 연구와 개발이 필요하다. 특히 자율공장이 실현되기 위해서는 인지, 계획기술, 실행 및 제어에 이르는 전 과정에서 AI가 적용되어야 하며, 그 영역은 설계, 생산, 물류/유통, 서비스에 이르기까지 매우 방대한 영역을 대상으로 하고 있으며, 또한 각 산업별, 도메인별로 매우 다양한 기술적 이슈들이 존재한다. 본고에서는 공장 내 제품생산공정을 대상으로 기술적 이슈 및 방향에 대해 살펴본다.

1. 제조 작업환경 인지 기술

공장에서 제품을 생산할 때 제조 환경을 인지하는 것은 매우 중요하다. 현재 스마트공장은 사물인터넷의 발전으로 제조 환경 내 정보를 센서로부터 생산 현장을 실시간으로 감지하여 생산조건의 변화, 설비 고장, 재고 위치변경 등 생산과 관련된 유의미한 정보를 관리한다. 향후 개인 맞춤 생산체계에서의 자율공장은 이러한 생산현장의 변화가 매우 빈번하며 정형화된 정보관리 이상을 요구하게 될 것이다.

제조 작업환경 인지 기술은 비전을 포함한 다양한 센서를 이용하여 고정되지 않은 비정형 환경 및 상황을 인지하고, 나아가 함께 작업을 수행하는 작업자의 의도를 인지하고 파악하기 위한 기술을 의미한다.

딥러닝의 발전으로 영상인식 기술이 크게 발전하면서 제조에서도 이를 적극적으로 적용하고 있다. 이미 Google, Amazon 등은 'Google Cloud Robotics Core'[11], 'Amazon Robomaker'[12] 등 자사 플랫폼을 활용하여 로봇의 인지를 위해 요구되는 다양한 인공지능 기술을 제공하고 있다. 미국 카네기 공대 RI 연구소, MIT AI 연구소 등이 로봇의 인지 관련 연구가 활발히 진행 중이고, 독일 프라운호퍼는 작업자의 상태 및 의도 파악을 위한 Robophobia 기술 개발을 추진하고 있다[13]. 산업계에서 제조에서의 인지 기술 적용을 위한 제품개발이 활발하게 진행 중이다. 특히, 벨기에의 PickIt[14]이나 일본의 MUJIN[15] 등이 3D비전을 기반으로 빈피킹을 할 수 있는 플랫폼을 제공하면서 3D비전에 대한 제조기업들의 기술진입 장벽을 크게 낮추었다.

하지만 제조 환경의 인지를 위해 필요한 데이터 수집은 여전히 문제로 남아 있다. 범용AI 응용

과 달리 제조에서는 해당 도메인에 데이터를 확보하기가 어렵기 때문에, 적은 데이터로 빨리 학습할 수 있는 방안이 매우 중요하다. 메타학습(Meta Learning), 능동학습(Active Learning) 등 적은 데이터로 좀 더 효과적으로 학습할 수 있는 방법이 필요하며, GAN(Generative Adversarial Nets)를 이용하여 부족한 데이터를 생성함으로써 데이터 증강을 통해 부족한 데이터 문제를 해결하는 방안 역시 고려될 필요가 있다. 또한, 자율공장에서는 인간과 기계의 협업이 매우 중요하기 때문에 작업자의 의도를 인지하는 기술 개발 역시 필요하다.

2. 협업작업 자율 계획 기술

자율공장에서의 작업은 로봇과 같은 제조설비가 스스로 자신이 해야 할 작업을 인지하고, 작업을 어떻게 수행해야 할지를 계획한다. 작업계획은 인공지능 분야의 가장 중요한 기술적 이슈로서 자동계획(Automated Planning) 또는 AI계획(AI Planning)이라는 이름으로 많은 연구개발이 이루어져 왔다. 제품생산공정에서 작업계획은 주로 공정계획, 이송/경로계획, 조립/파지계획 등에서 중요한 이슈가 된다.

Google은 위치 인식 및 경로계획을 위한 자율주행 SW인 Cartographer를 오픈소스로 공개하였고 [16], 로봇 조립계획 및 제어 분야에서 연구개발 추진 중이다. OpenAI는 강화학습 알고리즘을 활용하여, 로봇 매니퓰레이션을 위한 모션계획을 공개 소프트웨어로 개발한 바 있다[17]. 미국 MIT는 로봇이 다양한 종류의 사물들을 이동·분류할 수 있는 기술을 개발 후 공개했고[18], 뮌헨공대/아헨공대 등은 제품 도면을 주면 자동으로 작업을 계획하고 이를 조립할 수 있는 기술 개발을 진행 중이다. 산업계에서도 KUKA, ABB, FANUC 등 제조 로봇 기업들이 다품종 소량생산에 대응한 작업계획 및 실행 기술 개발을 추진 중이며, Universal Robot, Rethink Robotics 등은 협동 로봇을 대상으로 한 작업계획 및 실행 기술 개발을 추진 중이다.

일반적으로 작업계획은 도메인 모델과 초기 상태 및 목표가 주어졌을 때 가능하다. 하지만 자율공장에서 수시로 환경이 변화되고 불확실성이 높은 상황에 대응해서 적응적으로 동적인 계획이 가능해야 한다. 또한, 큰 규모의 복잡한 계층적 다중작업을 다수의 로봇 또는 제조설비가 서로 간 조정과 타협을 통해 최적의 계획을 생성하는 것 역시 매우 중요한 기술적 이슈이다. 자율공장에서는 인간과 기계의 협업이 매우 중요하기 때문에 인지 기술을 기반으로 작업자의 의도나 기대를 반영한 작업계획(Human-aware Planning) 역시 필요하다. 최근 딥러닝의 발전으로 기계학습과 고전 AI 계획을 함께 고려한 하이브리드 접근(Neurosymbolic AI) 역시 기술개발이 되어야 할 필요가 있다.

3. 유연생산 분산협업 실행제어 기술

자율공장에서 제품생산은 서로 다른 로봇 또는 제조설비들이 다른 로봇 또는 제조설비들과 협력하여 조립, 이송, 포장, 검사 등의 여러 가지 복잡한 작업을 자율적으로 수행한다. 이러한 멀티에이전트 기술은 중요한 인공지능 기술 분야이다. 최근 딥러닝 기술과 딥 강화학습 기술이 발전하면서 제조 실행 및 제어에서의 멀티에이전트 문제를 기계학습을 통해 해결하고자 하는 연구개발이 활발하게 진행되고 있다.

미국의 UC Berkeley BAIR 팀과 Google은 시뮬레이션 기반의 병렬 작업학습 및 실세계 지능 전이 기술의 개발을 진행 중이다. 미국의 Google은 APE-X, DeepMind는 IMPALA, TF-Replicator, UC

Berkeley는 Rllib 등의 멀티태스크 멀티에이전트 환경의 분산 병렬학습 기술을 개발 중이다[19]. 2017년 시작한 AI Robot 스타트업인 Covariant는 시뮬레이션 기반의 학습 및 실세계 지능 전이 기술을 활용하여, 물류창고에서 지속해서 변화하는 여러 가지 제품에 대한 이송작업을 자율적으로 수행하며, 서로 다른 로봇 간 지능을 전이 및 협업하는 기술 개발을 추진 중이다[20].

하지만 게임과 같은 응용이 아닌 제조에서의 AI 적용은 쉽지 않다. 제조의 실행과 제어에 활용되는 강화학습을 위해 실제 로봇이나 제조설비에서 수많은 시행착오를 반복해서 학습시키기는 불가능하므로 시뮬레이션 환경이 필요하다. 하지만 실제 상황을 그대로 모사하는 시뮬레이터를 만들기는 쉽지가 않으며, 따라서 시뮬레이션의 학습 결과가 실제 제조현장에 적용될 때 그 정확도는 부족할 수밖에 없다. 결국, 어떻게 하면 Sim2Real을 최대화할 것인지가 관건이 된다. 또한, 하나의 작업에서 학습이 다른 작업으로 바뀌면, 다시 학습해야 하는 문제를 해결하기 위해 Meta Learning 기법이 강화학습에서도 매우 중요하다. 작업계획과 마찬가지로 여러 다른 설비 간 대규모 작업의 실행 및 제어 역시 중요한 문제이다. 즉, 대규모 작업이 종단 간(End–to–End) 학습으로 해결되기에 아직 많은 어려움이 있어 멀티에이전트 학습을 통한 제조 실행 및 제어는 어려운 문제로 남아 있다.

V. 결론

본 고에서는 제조+AI를 통해 실현되는 미래 형상으로 "자율공장"의 개념을 소개하였다. 또한, 이를 실현하는 데 필요한 AI 기술들이 범용 AI와는 어떻게 다른지, 또한 기술 이슈들은 무엇이고, 이러한 이슈 해결을 위한 연구동향이 어떤지 살펴보았다.

이를 통해 국가 경제의 근간이자 우리 일상의 생산–소비를 담당하는 제조업에 AI가 융합되었을 때 ETRI가 바라보는 미래 형상과 연구 방향을 제시하였다.

AI와 융합된 미래 제조는 우리 일상에서 사용하는 수많은 제품의 생산과 소비 형태, 일자리 유형과 일터의 모습을 변화시킬 것이다. 본 고가 이러한 미래 제조 패러다임 변화에 대응하여 제조혁신을 실현하고, 국가의 산업 경쟁력 제고에 기여할 수 있기를 기대한다.

용어해설

유연생산시스템 생산성을 감소시키지 않으면서 여러 종류의 제품을 가공·조립할 수 있는 유연성이 큰 자동화 생산 라인

Workspace 작업자가 특정 작업을 수행하는 작업대를 포함하여 작업이 이루어지는 작업 공간 또는 작업 영역 전체를 의미

Neuro-symbolic AI 기계학습 중심의 연결주의적 접근과 로직이나 시맨틱 추론 중심의 기호주의적 접근을 함께 활용하는 인공지능 분야

Meta Learning '학습을 위한 학습'으로서 학습과정에서 얻어진 경험을 학습하여 새로운 모델의 학습에 활용함으로써 향상된 모델 성능을 얻는 학습 방법

Active Learning 주어진 데이터세트로부터 성능 향상에 효과적인 데이터들을 스스로 선별하여 학습을 하거나 사용자/환경과 상호작용하며 스스로 지식을 습득하는 학습방법

GAN 생성자와 식별자라고 하는 두 개의 신경망이 서로 경쟁하며 데이터를 생성하는 기계학습 모델

Sim2Real Transfer 시뮬레이션으로부터 학습된 결과가 실제 환경에 적용될 때의 차이 또는 오차를 최소화하기 위한 학습 및 전이 방법

약어 정리

CNN	Convolutional Neural Network
CPS	Cyber Physical System
GAN	Generative Adversarial Network

참고문헌

[1] Y. Koren, “The Global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems,” Wiley, 2010.

[2] 미래창조과학부 미래준비위원회, “[10년 후 대한민국] 미래전략보고서: 4차 산업혁명 시대의 생산과 소비,” 한국과학기술기획평가원, 2017.

[3] 손지연, “스마트팩토리 기반 개방형 제조 서비스 현황 및 과제,” 기술과 혁신, vol. 415, 2018, pp. 31-34.

[4] A. Schumacher, S. Erol, and W. Sihn, “A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises,” Procedia CIRP, vol. 52, 2016, pp. 161-166.

[5] 한국정보통신기술협회, “제조 경쟁력 향상을 위한 ICT 기반 스마트 팩토리 표준화 전략,” 2018, p. 5.

[6] Fraunhofer IWU, https://www.e3-fabrik.de/

[7] 김태완, 연승준, “ETRI AI 실행전략 6: 산업 공공 AI 활용기술 연구개발 및 적용,” 한국전자통신동향분석, 제35권 제7호, 2020.

[8] https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/ irb-14050-single-arm-yumi

[9] F. Suárez-Ruiz, X. Zhou, and Q.C. Pham, “Can robots assemble an IKEA chair?,” Sci. Robotics, vol. 3 no. 17, 2018.

[10] https://new.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/artificial-intelligence/prototype-robot-solves-problems-without-programming.html

[11] Google Cloud Robotics Core, http://googlecloudrobotics.github.io/core

[12] Amazon Robomakers, http://aws.amazon.com/ko/robomaker

[13] Fraunhofer IWU, Dynamic safety concept for human-machine interaction, http://www.iwu.fraunhofer.de

[14] Pickit3D, https://www.pickit3d.com/

[15] MUJIN, https://www.mujin.co.jp/en/

[16] Google Cartographer, https://opensource.google/projects/cartographer

[17] OpenAI, Ingredients for Robotics Research, https://openai.com/blog/ingredients-for-robotics-research/

[18] C. Atwell, “New MIT robotic system can pick-and-place objects that it’s never seen before,” 2018, https://www.hackster.io/news/new-mit-robotic-system-can-pick-and-place-objects-that-it-s-never-seen-before-a19896a4d50d

[19] 장수영 외, “심층 강화학습 기술 동향,” 전자통신동향분석, 제34권 제4호, 2019.

[20] Covariant.ai, https://covariant.ai/