

AI로봇기반 인간-기계협업기술 개론

임성수 · 엄주명 · 황효석 · 김대근 · 송지현 · 양정연
문형필 · 구자춘 · 김종현 · 최혁렬 · 황성호 · 박교식
김희철 · 박민수 · 전진우 지음

에너더스클

이 도서는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의
지원을 받아 수행된 연구임
(P0017033, 20021년 산업혁신인재성장지원사업)

This book was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT)
grant funded by the Korea Government(MOTIE)
(P0017033, The Competency Development Program for Industry Specialist)

「AI로봇기반 인간-기계협업기술 개론」은 AI로봇기반 SI분야 전문인력양성 및 활용을 통한 국가 제조경쟁력 제고에 기여하는 선순환 산업생태계를 조성하고자 산업 수요기술 중심의 인공지능 응용활용이 가능한 "고부가지능형 로봇 기반 SI 2.0 전문인력양성"을 최종 목표로 하는 「AI로봇기반 인간기계협업기술 전문인력양성사업」의 일환으로 제작되었습니다.

기존 로봇SI에 AI를 결합하여 범위를 확장하는 접근을 통해 학생들로 하여금 인간-기계 협업기술을 심화 습득 및 운영할 수 있도록 하고자 해당 교재를 개발하게 되었으며, 학생들이 전문지식 습득을 통해 기존 로봇SI의 한계를 극복하고 국내 제조 경쟁력 확보에 핵심적인 역할을 수행하길 기대합니다.

우리 교재는 석박사 학생들의 수준에 걸맞은 현장 실무에 필요한 내용을 다룹니다. 작업 과정에서 필요한 진정한 인간-기계 협업의 의미를 이해하고, 기존의 기계 중심-작업자 보조 방식에서 탈피하여 작업자 중심-기계 시스템 보조 형태의 협업을 통해 작업 속도와 효율을 높이는 데에 적용가능한 지식을 전달합니다.

산업지능, 협업제조기술, 인간-기계 인터랙션의 3대 특화분야에 대한 기초지식을 소분류하였고, 기업 수요조사, 전문가 그룹 토의를 거쳐 석박사 학생들에게 꼭 필요한 내용들을 엄선하여 담았습니다. 관련 분야 최고의 전문 역량을 보유한 교수진이 집필한 만큼 활용도가 높을 것이라 기대합니다.

아무쪼록 본 교재가 AI로봇기반 인간기계협업기술 전문인력양성을 위한 필독서로 자리매김하여 인재양성의 지평을 여는 자료로 활용되길 바랍니다.

이 교재를 제작하기 위해 많은 시간과 노력을 아끼지 않으신 경희대학교 임성수 교수님, 엄주명 교수님, 황효석 교수님, 단국대학교 김대근 교수님, 송지현 교수님, 목원대학교 양정연 교수님, 성균관대학교 문형필 교수님, 김종현 교수님, 구자춘 교수님, 최혁필 교수님, 황성호 교수님, 숭실대학교 박교식 교수님, 인제대학교 김만식 교수님, 김희철 교수님, 박민수 교수님, 한국로봇산업진흥원 전진우 실장님과 검토에 참여하여 주신 이지엔도서지컬 양운

제 소장님, 메가플랜 유철원 대표님을 비롯한 관련 업계 종사자분들에게 감사드립니다.

또한 이 교재가 국내 로봇 공학을 공부하고자 하는 학생들과 산업체, 학교, 연구소 등에서 로봇을 연구하는 관계자들에게 조금이나마 도움이 되기를 바라는 마음으로 출간하며, 차후에 부족한 내용이나 미진한 부분에 대해 보완할 계획이므로 다음의 도서 출판이 더 나은 내용으로 내실을 기하도록 많은 지적과 조언을 부탁드립니다.

2021년 12월

「AI로봇기반 인간기계협업기술 전문인력양성사업」 연구책임자 조영훈

제조업의 지속적인 경쟁우위 창출 및 안전한 산업현장 마련이 제조 생산성 향상과 더불어 궁극적으로는 국가 제조경쟁력의 기반이 되는 핵심 요인으로 인식되고 있습니다. 최근 들어 로봇 기술 고도화로 인간과 상호작용을 하면서 제조현장에 적용이 가능한 협동 로봇, 웨어러블 로봇, AI기반 제조업용 로봇 등 다양한 인간-기계협업형 기계가 출시되면서 제조업 혁신의 기폭제 역할을 할 것으로 기대되고 있습니다. 이러한 변화와 더불어 4차 산업혁명 관련 AI 기술의 급속한 발전이 더해져 최근에는 「AI로봇기반 공정설계 및 운영력」 즉, 「AI로봇기반 인간-기계협업기술」이 로봇 산업의 핵심 이슈로 부각되고 있습니다.

한국의 경우, 로봇 사용 밀도 세계 1위 수준이고, 로봇시장 추세에 맞춰 다양한 협동 로봇 제조기업이 확대되는 등 로봇산업이 꾸준히 확장되고 있음에도 불구하고, 대다수 기업에서 도전적인 신규 공정 개발 없이 반복적으로 유사한 저부가가치 공정에 로봇을 활용하고 있습니다. 이러한 현상은, 산업현장의 특수성을 이해하며 고부가 기술을 적용하여 로봇 자동화 공정을 재설계할 수 있는 로봇 SI 기술인력의 부족이 주요 원인 중 하나로 여겨지고 있습니다.

국내 로봇 SI기업은, 인간-로봇 작업공간 분리형 환경에서 협의의 로봇 SI를 낮은 기술력으로 수행하고 있으나, 제조업 혁신을 위해 인간-로봇협업기술과 지능(AI)을 결합한 고부가 SI로의 전환이 필요합니다. 「AI로봇기반 인간-기계협업기술」이 궁극적으로 「AI로봇기반 공정 설계 및 운영」과 관련된 기술임을 고려할 경우, 기존의 로봇인력양성 및 스마트팩토리 기반 협동 로봇의 범위를 뛰어넘는 차별화된 「로봇 SI」 관련 전문인력 양성이 반드시 필요합니다.

이러한 수요에 부응하기 위해 한국로봇산업협회를 주관기관으로 관련분야 전문성을 확보

한 6개 대학(경희대, 단국대, 목원대, 성균관대, 숭실대, 인제대)이 컨소시엄을 구성하여, 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원에서 지원하는 ‘AI로봇기반 인간기계협업기술 전문인력양성’ 사업을 2021년부터 5년간 수행하게 되었습니다.

이 사업은 국내 제조기업의 공정 자동화, 지능화 촉진은 물론 이를 통한 생산성 제고에 기여할 수 있는 「고부가 지능형 로봇 기반 SI 2.0 전문인력 양성」을 목표로 하고 있으며, 이 목표 달성을 위해 해당 컨소시엄은 최적의 전문 교육과정을 구성하였습니다. 이 교육과정에 참여하는 대학원생의 전공분야(기계공학, 컴퓨터공학, 산업경영공학, 로봇공학 등)의 다양성을 고려할 때 「AI로봇기반 인간-기계협업기술」에 포함되는 다양한 기술과 이론의 개요를 종합적으로 소개하는 도입 과목의 개설이 필요하다고 판단되어, 컨소시엄에 참여하는 전문가들이 공동으로 운영하는 과목을 개설하게 되었고, 이 과목의 교재로서 본 책자가 집필되었습니다.

서로 다른 배경지식을 갖고 있는 다양한 전공분야의 공학계열 대학원 신입생들에게 「AI로봇기반 인간-기계협업기술」을 소개하고, 각 전공분야별로 구성된 전문 특화 교육과정의 이수를 위한 공통기초지식을 전달하기 위해 개발된 교재라는 점을 고려할 때 「AI로봇기반 인간-기계협업기술」에 관심이 있는 다양한 상황의 여러 관계자들에게도 종합적인 기술소개서로서 의미가 있는 책이 될 것으로 기대합니다.

2021년 12월

‘AI로봇기반 인간기계협업기술 전문인력양성’ 사업 참여교수 일동

AI로봇기반 인간-기계협업에 있어서 제조 시스템은 가장 중요한 활용 분야 중 하나입니다. 실제로 제조 공장에는 매우 많은 산업용 로봇이 활용되고 있습니다. 특히 대한민국에서는 고용인 대비 로봇의 비율이 가장 높은 나라로 협동 로봇으로의 전환에 있어 기술적/사회적 영향력이 큼니다. 이러한 이유로 생산 프로세스를 이해하고 이에 적합한 로봇에 인공지능 활용을 개발하는 것이 중요합니다. 제조 시스템은 시대적으로 시장의 요구에 따라 대량생산에서 다품종소량생산으로 변화하면서, 유연생산방식에서부터 홀로닉생산방식, 재구성가능한 생산시스템, 그리고 스마트공장까지 진화해 왔습니다. 이 책에서는 이러한 변화에 맞춰 로봇 시스템이 어떻게 활용되고 개선되어야 될지를 논의합니다.

스마트공장에서의 로봇은 단순 자동화기기를 넘어서 인간과 협업할 수 있는 형태로 변화하고 있습니다. 이를 위해서 컴퓨터비전기술과 가상현실이 폭넓게 사용되고 있습니다. 대표적인 사례가 bin-picking 로봇입니다. 3D 비전을 활용한 딥러닝 기술은 정확한 조작이 필요한 제조회장에 필수적으로 요구되고 있습니다. 한편 매년 다양한 제품을 조작하기 위해서 Teach pendant에서 벗어나 가상환경에서 로봇 스스로 새로운 형상 조작을 학습하는 강화학습 방법이 개발되고 있습니다. 이렇듯 기술 개발은 제조 환경의 작업자가 총체적인 공장 상황에 집중하고 세세한 로봇 조작에 시간을 줄임으로써 다품종 소량생산 환경을 실현할 수 있게 합니다.

경희대학교 엄주명

지능형 로봇 시스템은 외부 환경을 스스로 인식하고, 상황을 판단하여 자율적으로 동작하는 시스템을 뜻합니다. 이 책에서 다루는 비전 및 인식 시스템은 로봇이 다양한 센서를 통해 외부 정보를 입력 받고, 상황을 판단할 수 있는 정보를 추출하는 다양한 방식들에 대해서 다룹니다. 먼저, 로봇이 사용하는 다양한 센서들의 종류와 원리들에 대해서 살펴봅니다. 이후 데이터를 가공

하는 방식과 이들을 통해 정보를 추출하기 위한 특징 추출 및 기술에 대한 개념과 예시를 살펴볼 것입니다. 인지라고 하는 것은 몇 가지 하위 개념으로 분류할 수 있습니다. 물체 인식, 얼굴 및 자세/행동 인식, 3차원 복원, 지도 작성 및 위치 인식 등의 개념을 살펴보고 실제 로봇이 사용하는 알고리즘에는 어떤 방식이 있는지 알아볼 것입니다. 이를 통해 시각 처리를 위한 다양한 센서와 처리 방식, 그리고 애플리케이션에 대한 개념 및 예시를 통해 지능형 로봇 시스템의 비전 및 인식 지능에 대한 지식을 습득할 수 있습니다.

경희대학교 황효석

이 책은 인공지능과 기계학습에 대한 기초적인 내용을 포함하고 있습니다. 4차산업혁명의 핵심 기술로 자리매김하고 있는 인공지능과 기계학습 기술은 최근 빅데이터 구축과 고속연산기능을 통해 다양한 응용분야, 특히 로봇관련 산업 분야에서 적극적으로 활용되고 있습니다. 이러한 인공지능 관련 기술들에 대한 학습 수요가 급격히 증가하고 있는 상황에 이를 활용하는 교육보다는 인공지능망 구조와 기계학습 알고리즘을 설계하는 전문교육에 치중되어 있어, 처음 입문하는 수요자들이 인공지능과 기계학습의 추상적인 개념보다 좀더 현실적인 개념을 이 책을 통해 학습할 수 있도록 구성해 보았습니다. 이에 이 책에서는 인공지능기술을 활용하는 입장에서 수학적 내용보다는 개념적인 설명을 중심으로 인공지능의 기본 구성요소, 현재까지 개발된 가장 기본적인 다양한 인공지능망의 구조에 대해 설명하고, 이러한 인공지능망을 구성한 후, 다양한 기계학습 방법을 이해하기 위해 필요한 기본 개념과 다양한 기계학습 알고리즘에 대해 소개합니다. 이 책을 통해 향후 인공지능과 기계학습의 다양한 응용분야에 적용하는 기반을 갖추 수 있기를 기대합니다.

단국대학교 김대근

4차 산업혁명은 최근 다보스포럼을 통해 전세계적 화두로 등장한 이래로, 다양한 분야를 융합하며 우리 삶에 혁신적인 변화를 일으키고 있습니다. 특히 IoT, 빅데이터, 인공지능 등의 첨단 정

보통신기술을 통해 제조시스템에도 많은 변화가 일어나고 있습니다. 이 책에서는 4차 산업혁명 및 스마트 생산의 기본 개념과 특징에 대해 살펴보고 전통적인 생산 방식과 어떤 차이가 있는지에 대해 다룹니다. 스마트생산 시스템은 제조 시스템 내에 지능적으로 상호 연결된 환경을 구현하여 실시간으로 프로세스를 모니터링할 수 있는 통합된 협업 제조시스템을 의미합니다. 스마트생산에서 중요한 전제 조건은 사이버 세계와 물리적 세계의 통합이며, 시스템 통합의 수단으로 사용되는 사이버-물리 시스템과 디지털 트윈의 기본 개념을 정리하였습니다. 또한 스마트 공장을 구축하기 위해서 필요한 각종 핵심기술인 적층 공정, 증강 현실, 시뮬레이션, 자동 로봇, 사물인터넷, 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅, 사이버 보안 등의 개념을 간단하게 소개하였습니다. 스마트생산 시스템은 고객요구 대응, 설비효율 향상, 비용 절감 등 다양한 장점을 가지고 있어 앞으로 적용이 확대, 발전될 것으로 기대됩니다. 이에 이 책을 사용하는 학생들이 스마트생산의 기본 개념을 이해하여 앞으로 변화하는 제조시스템의 흐름을 이해하고 더 나아가 심화 기술을 이해하고 적용하는 데 도움이 되기를 바랍니다.

단국대학교 송지현

로봇 분야에는 지난 15년간 기존 지식의 범주를 넘어서는 다양한 이론과 연구 성과들이 등장하였습니다. 모델링 기반의 문제들이 확률 기반의 수학적 도구들과 결합하며, 기존에 해결하지 못한 영역이 필요에 의해 다시 주목받는 다이나믹한 과정으로 진행되어 왔습니다. 더불어 최근 딥러닝에 의한 인식을 향상으로, 지능형 로봇 분야는 다시 한번 영역이 확장되며 기술군 전체가 고도화 시기에 들어가고 있습니다.

지난 겨울 여러 교수님과 협회의 도움으로 인간-기계 협업 분야의 교과목 모델을 개발하며, 문득 여러 교수님들이 공부하던 시절에 비해 대학원생 여러분이 감당해야 할 영역이 정말 많이 늘어났다는 생각이 들었습니다. 학문이 정체되지 않고 발전하는 것은 로봇 분야에 몸담고 있는 입장에서 반가운 일이지만, 다양한 교과목을 새로 습득해야 하는 대학원생 여러분에게는 크나큰 부담이 되리라 생각합니다.

인간-기계 협업은 이제서야 여러 기술적 보완에 의해 진정한 가치가 시작되는 지점에 놓여있

다고 생각합니다. 배우는 대학원생과 가르치는 교수님들 모두 힘들겠지만, 우리는 협업분야의 R&D 최전선에 있습니다. 참여하는 대학, 조직 모두 같이 열심히 동참해주시고, 대학원생 여러분, 우리 같이 밤새워 봅시다.

목원대학교 양정연

지금도 다양한 분야에서 로봇이 사용되고 있지만 로봇의 응용분야는 사회 전반에 있어서 더 크게 확대될 것으로 기대되고 있습니다. 최근의 팬데믹으로 인한 사회 환경 변화는 로봇의 활용을 더욱 가속화하고 있습니다. 로봇의 활용이 더욱 다양해지기 위해서는 로봇이 독립되고 고립된 환경에서만 작동하던 것에서 벗어나, 안전이 보장된 로봇이 사람이 활동하는 환경 안에서 사람과 유기적으로 협동하여 필요한 서비스를 제공할 수 있어야 합니다. 또한, 이동하며 단순 정보만 전달하는 형태가 아니라, 환경과 물리적인 접촉을 하고 물건을 집어드는 기능에 기반한 서비스가 개발되어야 할 것입니다.

안전과 파지로 대표되는 이러한 기술은 다양한 방법으로 개발되고 있고 그 이론의 폭과 깊이가 다양합니다. 본 교재에서는 안전협동로봇에 적용되고 있는 기본적인 충돌인식 기술 및 직접 교시 기술을 수학적 모델을 통하여 살펴봅니다. 또한 산업 현장에서 물건을 잡기 위한 로봇 그리퍼에 대해 알아보고 물건을 파지하는 것을 수학적으로 모델링하여 파지 제어를 하기 위한 기초 지식을 살펴봅니다. 안전협동로봇 기술과 파지의 많은 내용이 수학적으로 기술되어 있으나 엄격한 증명은 생략하고 개념을 이해할 수 있는 수준으로 정리하였습니다. 본 교재를 사용하는 많은 학생들이 안전협동로봇 및 파지의 기초적인 내용을 이해하여 향후 보다 심화된 기술에 쉽게 다가갈 수 있는 발판이 되기를 기대합니다.

성균관대학교 문형필

법가(法家) 중의 한 사람인 관중(管仲)은 그의 저서 『관자(管子)』의 《목민편(牧民篇)》에서 다음과 같이 말하였습니다. “창고(倉庫)에 곡식(穀食)이 가득 차면 예절(禮節)을 알고, 의식(衣食)이 갖

추어지면 영욕(榮辱)을 안다(倉庫實則知禮節 衣食足則知榮辱 : 창고실즉지예절 의식족즉지영욕).” 이 말은 흔히 줄여서 의식족이지예절(衣食足而知禮節)이라고도 사용되며, 백성(百姓)은 입고 먹는 것이 넉넉해야 예의(禮儀)나 체면(體面), 법(法) 등을 알게 된다는 말입니다. 이 표현에서 예절에는 요즘에는 안전이나 환경 등에 대한 관심도 포함될 것입니다.

우리의 국민소득이 3만달러를 넘어섰고 경제규모도 세계 10위권이니 기본생활에 필요한 의식주 걱정은 덜은 셈이며, 결과적으로 우리의 안전과 환경에 대한 관심은 더욱 커졌습니다. 지금은 ‘무역의 날’로 이름을 바꾼 ‘수출의 날’도 불과 두 세대 전, 수출 1억 달러를 달성한 1964년 11월 30일을 기념하기 위한 것임을 기억하면 우리나라의 위상은 그야말로 도약을 도약을 거듭한 것입니다. 기술의 발달이 가속화되면서 우리의 생활도 예전에 누리지 못하는 편리함을 누리게 된 반면, 환경이나 인류에게 가해지는 일상의 위협도 커지게 되었습니다. 안전은 대표적인 공공재로서 이른바 투자회임기간(Induction period)이 매우 긴 특징과 여러 분야에 걸친 전문성이 결합되어야 효과적인 해결책을 마련할 수 있는 분야입니다. 로봇, AI, 스마트팩토리 등으로 대표되는 인력양성사업에서도 안전분야가 필수이며 음악도 주된 멜로디에 화음이 들어가야 풍성한 들을 거리를 제공하여 주듯이, 산업용 로봇기술도 안전이 융합되어서 로봇산업이 국가를 풍성하게 하는데 기여하였으면 하는 바람입니다.

승실대학교 박교식

HRI는 로봇에 대한 기술만으로 이해될 수 없습니다. 로봇을 활용하는 주체인 바로 그 인간을 알아야 합니다. 시작은 과학과 기술에 있지만, 끝은 인간을 향하는 학문이 HCI이며 HRI입니다. 우리 모두 로봇 사용자인 인간에 대한 탐구와 관심을 넓혀 가기를 소망합니다. 그런데 아직 HRI는 인간보다는 기술에 초점이 더 맞춰져 있습니다. 특별히 HRI에서는 인간과 같이 지각하고, 생각하고, 행동할 줄 아는 로봇을 만들고 싶기에, 현재 인공지능 기술이 모든 기술에 앞서 강조되어 있습니다. 필자도 이러한 흐름을 따라, 인공지능 기술, 그 중에서도 인식(perception) 기술을 강조하여 7장을 기술하였습니다. 이는 짧은 지면에 모든 것을 실을 수 없어 어쩔 수 없이 택한 결정이기도 합니다. 이후 본 장에서 자세히 다루지 않은 추론 능력과 동작성 지능 등에 대한 인공지능

기술에 대한 이해가 필요할 것으로 봅니다.

그런데 인공지능 기술에 대한 이해를 넓히다 해도 궁극적으로는 로봇과 소통하는 인간에 대한 이해가 중요합니다. 인간은 로봇과 무엇을 소통하기를 원하는지, 어떤 방식으로 상호작용하는지, 로봇과 대화하는 인간의 감성적 측면은 어떤지, 인간과 소통할 때와 로봇과 소통할 때가 어떻게 다른지, 혹은 그 기대치가 어떻게 다른지 등에 대한 관심과 이해가 필요합니다. 로봇 기술이 발달하게 되면 최종 지점에서는 HRI가 중심이 될 것입니다. 기술에서 시작하여 인간으로 끝을 맺는 학문이 HRI임을 기억할 필요가 있습니다. 미래에는 로봇과 더불어 행복한 우리들이 되기를 기원합니다.

인제대학교 김희철

본 책의 내용은 저자가 대학에서 안전공학에 관하여 수년간 강의를 통해 얻은 자료를 바탕으로 정리한 것입니다. 가능한 한 너무 전문적인 이론은 제외하고 산업안전보건법에 근거한 기계 부분, 특히 산업현장에 적용되고 있는 산업용 로봇의 안전에 관한 전반적인 내용을 평이하게 서술하도록 노력하였습니다. 특히 현재는 산업환경과 사회적 인식의 변화로 인해 사업장에서 일하는 노동자의 건강과 안전에 놀랄만한 발전이 이루어졌습니다. 그러나 아직도 사업장에서는 일하는 노동자의 건강한 삶을 유지하기에는 부족한 점이 많이 보입니다. 이에 산업안전보건법을 기준으로 노동자들이 반드시 알아야 하는 기초적인 산업안전보건법의 기본 취지의 의미를 명확하게 전달하고자 노력하였습니다. 또한 현재 많이 보급되고 있는 산업용 로봇 사용에 따른 재해를 방지하기 위한 산업용 로봇의 설치·사용 등에 필요한 안전장치에 관해 기술하였습니다. 이 책은 엄밀하게 말하면, 산업용 로봇 안전의 입문서라고 밖에 할 수 없으며, 더 깊은 내용을 이해하고자 하는 사람은 각종 로봇공학에 관련된 전문서적과 안전공학에 대한 서적을 참고하여야 할 것입니다. 끝으로 이 책의 내용 중 미비한 점, 부정확한 점 등은 앞으로 지속적으로 보완·보정되어질 것입니다. 이 책을 읽을 독자 여러분의 많은 지도 편달을 바랍니다.

인제대학교 박민수

4차 산업혁명 시대를 대변하는 사회적 변화상을 상징적으로 설명한다면 CPS(Cyber Physical System)의 실현이라고 할 수 있습니다. 즉, 클라우드(가상)의 세계와 물리(현실)의 세계가 유기적으로 연동되어 그간의 모든 사회 체계가 움직이는 방식으로 재편되는 것입니다. 실제 우리 주변의 상품 서비스들과 우리가 현재 공부하는 대다수의 스마트 기술들이 이를 구현하기 위한 방향으로 연구, 실증되고 있다 해도 과언이 아닙니다. 이 중에서도 CPS에서 현실 세계를 담당하는 대표적인 기술이 로봇틱스입니다. 완전 자율 자동화되기에 앞서 현 시점에서 중요하게 요구되는 것이 인간과 로봇 간의 협업 노동 개념을 새롭게 정립하는 것입니다. CPS 방식을 기존의 노동 활동 속에 활용할 수 있는 능력이 곧 경쟁력이 되는 시대가 된 것입니다.

이러한 시대적 흐름에 발맞춰 '인간-기계협업기술' 인력양성 프로그램이 출발하였으며 기초적인 이해를 돕고자 본 개론서가 저술되었습니다. 부디 인간과 기계 간 슬기로운 협업을 위해 인공지능, IoT, 빅데이터, 공정설계, 기계/로봇/장비, 위험성과 안전 등에 관한 스마트 기술에 대한 이해도를 더욱 높여 새로운 시대를 선도할 수 있는 핵심 인재로 성장하는 데 본 교재가 기여하기를 기대합니다.

한국로봇산업진흥원 전진우

인사말	3
서문	5
지은이의 말	7

CHAPTER 1 인간-기계협업기술 개요 21

- 1. 개요 21
- 2. 협업의 기술적 정의 23
- 3. 협업 소요 기술 27
 - 3.1 협업 제조 기술 30
 - 3.2 인간-기계 인터랙션 33
 - 3.3 산업 지능 37
 - 3.4 현장 활용 기술 39

CHAPTER 2 산업 프로세스와 산업 지능 41

- 1. 개요 41
- 2. 산업 프로세스 42
- 3. 유연 생산 시스템 43
- 4. Holonic Manufacturing System 46
- 5. Reconfigurable Manufacturing System 50
- 6. 산업 인공지능 54
- 7. Bin Picking 55
- 8. 가상현실 57

CHAPTER 3 인공지능과 기계학습 61

- 1. 인공지능 62
 - 1.1 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 63
 - 1.2 다층 퍼셉트론(Multilayer Perceptron, MLP) 65
 - 1.3 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN) 68
 - 1.4 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN) 69

-
- 1.5 인공지능 작업(AI Tasks) 71
 - 2. 기계학습 79
 - 2.1 개요 79
 - 2.2 지도학습(Supervised Learning) 84
 - 2.3 비지도학습(Unsupervised Learning) 87
 - 2.4 강화학습(Reinforcement Learning) 89
 - 3. 마치며 90

CHAPTER 4 **스마트 생산** 91

- 1. 스마트 생산(Smart manufacturing) 91
 - 1.1 4차 산업혁명과 스마트 생산 91
 - 1.2 제조 패러다임의 변화 93
 - 1.3 스마트 생산 시스템의 적용 95
 - 1.4 스마트 생산 시스템의 장단점 95
 - 1.5 스마트 생산 시스템의 요소 기술 96
- 2. 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical System, CPS) 97
 - 2.1 정의 97
 - 2.2 구조 98
 - 2.3 구성요소 99
 - 2.4 특징 100
 - 2.5 적용 분야 101
- 3. 디지털 트윈(Digital Twin, DT) 101
 - 3.1 정의 101
 - 3.2 구성요소 102
 - 3.3 장점 103
 - 3.4 적용 분야 103
- 4. 요소 기술 104
 - 4.1 적층 제조 104
 - 4.2 증강 현실 기술, AR 106
 - 4.3 시뮬레이션 108
 - 4.4 자동 로봇 109
 - 4.5 IIoT 110
 - 4.6 빅데이터 111
 - 4.7 클라우드 컴퓨팅 114

-
- 4.8 사이버 보안 115
 - 5. 마치며 116

CHAPTER 5 **안전협동로봇** 117

- 1. 개요 117
- 2. 접촉 및 외력 감지 120
 - 2.1 로봇 동역학 모델 120
 - 2.2 로봇 동역학 모델을 이용한 외력 계산 121
 - 2.3 정확한 로봇 동작을 가정하고 외력 계산 121
 - 2.4 외란관측기를 이용한 외력 추정 122
- 3. 직접 교시 125
 - 3.1 어드미턴스를 이용한 직접 교시 126
 - 3.2 임피던스를 이용한 직접 교시 127

CHAPTER 6 **로봇 그리퍼와 파지 조작 기술** 131

- 1. 개요 131
- 2. 산업용 로봇 그리퍼 132
 - 2.1 임팩티브 그리퍼(Impactive gripper) 134
 - 2.2 잉그레시브 그리퍼(Ingressive Gripper) 136
 - 2.3 애스트릭티브 그리퍼(Astrictive gripper) 137
- 3. 파지 139
 - 3.1 파지 정역학 140
 - 3.2 파지 기구학 147

CHAPTER 7 **인간-로봇 상호작용** 153

- 1. 인간 컴퓨터 상호작용 155
 - 1.1 HCI의 정의 155
 - 1.2 융합정보과학으로서의 HCI 158
 - 1.3 HCI 학문의 진화 160
 - 1.4 사용성 162
- 2. 인간 로봇 상호작용 166
 - 2.1 HRI의 정의 167

CHAPTER 8 융합안전기술 179

- 1. 안전 기술 180
 - 1.1 분야별 안전(공정안전) 183
 - 1.2 분야별 안전(건설안전) 186
 - 1.3 분야별 안전(인간공학) 188

CHAPTER 9 산업용 로봇 안전 193

- 1. 위험성 감소 기술적 대책 198
 - 1.1 기술적 위험성 감소 대책 198
 - 1.2 위험 특성에 따른 위험성 감소 대책 201
- 2. 위험성 평가 절차 204
- 3. 디스크 스냅링 조립 공정의 위험성 평가 205
 - 3.1 주요 위험요인 205
 - 3.2 위험성 평가 기준 정립 206
 - 3.3 위험성 평가 기준 207
 - 3.4 위험성 평가 결과 209
- 4. 디스크 스냅링 조립 공정의 위험성 저감 210
 - 4.1 위험성 저감 조치 210
 - 4.2 국제규격에 의거한 저감 조치 212

CHAPTER 10 비전 및 인식 지능 213

- 1. 로봇 비전 시스템 구조 213
 - 1.1 비전 센서 및 데이터 214
 - 1.2 데이터 전처리 217
 - 1.3 특징 추출 및 기술 217
 - 1.4 분류 219
 - 1.5 심층 신경망 기반 시스템 220
- 2. 비전 인식 221
 - 2.1 물체 인식 221
 - 2.2 얼굴 및 자세/행동 인식 223

2.3 3차원 복원	225
2.4 지도 작성 및 위치 인식	226

CHAPTER 11 협동 로봇 안전 요구조건 및 안전 제어 227

1. 협동 로봇	228
2. 안전, 위험성 기본 개념	230
3. 협동 로봇 안전 요구조건	236
4. 협동 로봇 안전성 평가와 안전 제어	243
5. 마치며	245

CHAPTER 12 이동 로봇 247

1. 개요	247
2. 확률 기반 접근	249
2.1 확률 기반의 주행 기법	249
2.2 측정(Measurement)과 관측(Observation)	257
3. 자율 주행	260
3.1 기술적 정의	260
3.2 차선 추종 기능(LFA)	262
4. 매핑의 개요	269

CHAPTER 13 네트워크 통신 및 시스템 통합 프로그래밍 275

1. 개요	275
2. 시스템 구성 개요	277
2.1 시스템 구성도(System Architecture)	277
2.2 네트워크 구성	279
2.3 OS의 실시간성	282
2.4 타이머와 스레드	286
2.5 시스템 부하의 분배	293
3. 통신과 스레드	297
3.1 바이너리 데이터 vs. 텍스트 데이터	298
3.2 프로토콜 설계	300
3.3 CRC 설계	302

-
- 3.4 스펙트럼 구성 303
 - 4. 다양한 통신 기법 사례 309
 - 4.1 네트워크 프로그래밍 309
 - 4.2 Matlab과 응용 프로그램 연결 310
 - 4.3 웹 브라우저와 응용 프로그램 연결 310
 - 4.4 공유 메모리 311
 - 4.5 블루투스 사용 311

CHAPTER 14 **안전표준과 인증** 313

- 1. 산업안전보건법의 체계 313
 - 1.1 산업안전보건법의 역사 313
 - 1.2 산업안전보건법의 목적 315
 - 1.3 산업안전보건법의 주체 및 의무 316
- 2. 로봇의 안전인증 318
 - 2.1 산업용 로봇의 재해현황 318
 - 2.2 유해 · 위험 기계 등에 대한 조치 322
 - 2.3 산업용 로봇 관련 안전표준 330

I

인간-기계협업기술 개요



1. 개요

본 과목은 인간과 기계의 협업에 필요한 관련기술의 소개와 이해를 통해 산업에서의 협업 서비스 설계와 사례를 발굴하고, 산업 분야에서 협업 기술의 파급과 궁극적으로 우리가 제시하는 협업은 무엇인가? 라는 답안을 찾아가는 데 목적이 있다.

먼저, 인간-기계 협업이란 과연 무엇일까?

공학적으로는, 작업자 중심의 태스크 수행을 위해 기계 또는 로봇이 보조적 역할을 수행하는 협력 관계를 의미한다. 또한, 협업의 사전적 정의는 둘 이상의 에이전트가 무언가를 위해 서로 협력하는 행위를 말한다. 따라서, 협업에는 참가자 간의 합의를 통해 공동의 목표를 달성하는 것이 필요하다. 이러한 협업의 정의를 서로 다른 에이전트인 인간과 로봇에 그대로 적용하기에는 다소 어려움이 있지만, 상호 협력과 목표 달성이라는 의미를 산업과 서비스 분야로 옮긴다면 협업의 의미와 필요성을 이해하기 쉽다.

기존의 로봇 자동화를 예로 들어 보면, 작업자와 로봇이 같이 투입되는 공정이 많다. 컨베이어로 대표되는 대량 생산 체제에서, 작업자와 로봇은 정해진 시간에 맞춰 각자의 일을 독립적으로 처리하여 최종적으로 제품 생산이라는 목표를 달성한다. 하지만 상호 간의 협력과 합의는 찾아보기 어렵다. 시간에 따른 공정 스케줄에 따라 작업자와 로봇은 자기 역할을 진행하여 최종 목표에 도달하는 경우다.

인간-로봇의 자연스러운 관계 형성을 위한 인간-로봇 상호작용(Human-Robot Interaction)

분야를 예로 들어보자. 이는 인간에게 친숙한 시각, 음성, 터치 기반의 모달 정보를 토대로, 인간과 로봇이 대화를 수행하며 서로에게 상호 영향을 주는 행위를 말한다. 예를 들어 키오스크 안내 서비스를 이용하는 경우, 로봇은 인간의 언어를 이해하고 그에 대한 답변을 제시할 수 있다. 하지만 이러한 안내 서비스에는 양자 간의 공동 목표가 있다고 보긴 어렵다.

해외에서 진행되고 있는 인간-기계 협업의 대표적 사례로는, 자동차 조립 공정을 들 수 있다. 인간과 로봇이 같은 공정에 투입되고 서로 협력에 의해 제품을 생산하는 방식이다. 이러한 협업 공정과 기존 자동화 공정의 차이점은, 공정 프로세스의 전개가 무엇에 의해 결정되는가에 달려 있다. 컨베이어의 정해진 속도에 맞춰 작업하는 기존 방식과 달리, 인간의 작업 속도에 따라서, 또한 단계적 수행에 대한 작업자 판단에 따라 로봇이 보조를 맞추어 작업하는 것을 협업의 대표적 사례로 볼 수 있다. 이러한 협업의 대표 사례를 통해 인간-기계 협업을 다음처럼 정의할 수 있다.

인간-기계 협업에서는, 작업자 중심의 태스크 수행과 로봇의 보조적 역할에 따라 공동의 목표는 기존 로봇 자동화와 동일한 제품의 생산이지만, 작업의 진행이 작업자의 처리 속도에 따라 결정되며, 공동 협력은 작업자의 판단에 따라 로봇이 다음 과정을 처리하는 방식으로 구성된다.

자동차 조립 공정에서 협업은 양 에이전트의 특성을 반영하여 구성할 수 있다. 섬세하고 자동화로 처리하기 어려운 공정은 인간이 처리하고, 중량물의 이송 및 정교함이 필요한 반복 공정은 로봇이 담당한다. 세부 공정에서 다음 단계로 진입하려면, 인간의 작업이 늦어지는 경우 로봇은 작업이 끝날 때까지 기다릴 수 있어야 한다. 또한 로봇의 작업이 완료되면, 인간은 다음 단계의 태스크 진행에 대한 판단을 수행하여, 전체 공정을 인간 작업자 중심으로 처리하는 것을 의미한다.

이러한 인간-기계 협업은, 기존의 로봇 자동화와 구분을 위해 산업 현장에서 정의되는 협업의 한 유형이다. 산업에 따라, 또는 서비스에 따라 인간-기계 협업은 다양한 정의와 형태를 지닐 수 있다. 하지만 협업의 가장 중요한 요소는, 기존의 기계 자동화에 작업자가 보조하던 방식을 벗어나, 작업자 중심과 기계 시스템의 보조 역할을 통한 공동 작업 수행에 있다.

작업자 중심의 협업을 진행하려면 몇 가지 중요한 기술적 전제가 필요하다. 로봇은 사람

의 작업 상태를 인식할 수 있어야 하며, 작업자와 공동 협력을 위한 안전을 보장해야 하고, 보조 작업 수행을 위한 로봇 자체의 작업 스킬이 필요하다. 하지만 이러한 인간-기계 협업에서 중요한 요건 중 하나는, 역설적으로 협업의 필요성에 대한 철학 자체이다.

기술 우선을 통해 작업자의 안전을 고려하지 않거나, 인건비 절감을 위해 무리하게 자동화를 추진하는 것, 막연히 자동화에 따른 일자리 감소를 걱정하는 것 등은 인간-기계 협업의 필요성을 간과하는 문제점들이다. 아쉽게도 인간-기계 협업은 이제 겨우 시작 단계에 있는 분야이다. 거대한 로봇 자동화 설비로 대표되는 자동차 조립 라인의 경우에도 보이지 않는 곳에서 여전히 작업자의 수작업 공정이 이루어지고 있으며, 기술적, 경제적 한계에 의해 완전 자동화가 가능한 생산 품목은 소수에 불과하다.

협업은 경제적 측면에서 필수적인 방법론으로 자리매김할 가능성이 크다. 세계적인 경제 위기 속에서 각국의 제조업은 효율과 비용 절감을 통한 구조조정이 불가피한 상황이다. 기존의 대량 생산 체제와 글로벌 생산 방식의 경쟁력 약화로 자국으로 회귀하는 리쇼어링(Reshoring) 현상이 증가하고 있으며, 다품종 소량 생산에 의한 매출 증대와 맞춤형 제조 방식으로 전환이 가속화되고 있다.

이러한 변화는 소규모 사업장의 제조 분야 혁신으로 이어지고 있으며 고비용, 고위험의 설비에 의한 대량 생산 방식보다 유연 생산 방식에 대한 관심이 급증하는 추세이다. 인간-기계 협업은 이러한 생산 방식의 근본적 변화인 노동 환경의 개선, 기존 노동력의 유지 및 활용, 인간이 가진 경험 기반의 스킬 활용 등 높은 경제성을 추구할 수 있어, 기술 고도화에 따른 저비용의 유연성 있는 생산을 주도하게 될 주요 핵심 기술이라 할 수 있다.

2. 협업의 기술적 정의

인간-기계 협업은, 산업 4.0을 통해 그 중요성이 부각되기 시작했다. 기계, 로봇 시스템의 활용 분야가 서비스보다는 제조업 중심으로 진행되었기 때문에, 제조 현장에서의 자동화 변화 과정을 통해 협업에 대한 유형을 살펴볼 수 있다.

하지만 이제는 이러한 제조 분야뿐 아니라, 이동 로봇을 이용한 서비스 분야의 급성장에 따라 안전사고에 대한 우려가 커지고 있다. 인간과 로봇이 단순히 작업 공간을 나누어 쓰는

것뿐만 아니라 상호 간의 협력과 상호작용에 대한 설계, 기술 개발이 필요한 시점이다. 이러한 협업을 이해하기 위해 이를 다음 세 가지 유형으로 나누어 보자.

1. 공존(Coexistence)

산업 현장을 살펴보면 작업자와 함께 다양한 설비가 복잡하게 배치되어 있다. 기계 장치는 대부분 고정되어 있고, 작업이 시작됨에 따라 작업자가 투입되어 공정별로 작업자 동선이 배치되는 방식이다. 기계 장치의 움직임에 따른 안전사고를 방지하기 위해, 작업자와 기계가 서로 인접한 공간에서 서로 독립적인 작업을 하게 되는 것을 공존이라 부른다.

이러한 자동화 설비의 경우, 작업자 공정과 자동화 공정이 서로 분리되어 컨베이어를 이용하여 중간 제품이 이송되는 방식으로 설계된다. 일반적으로 산업용 로봇은 기계 장치로 분류되어 안전 펜스 설치를 통해 작업자 공정과 완전히 분리된다. 기계 사이에 작업자가 끼이게 되는 협착, 부딪힘에 의한 충돌 등의 안전사고를 방지하기 위해 작업 구역의 분리가 필요한 경우이다.

따라서, 자동화 공정과 작업자 공정이 완전히 분리되어 각 공정별로 투입(로딩)과 배출(언로딩)로 표현된다. 로봇 또는 기계 자동화와 작업자 간의 연계 과정에서 수리, 점검, 준비, 설치 작업을 위해 작업자가 자동화 공간에 들어가게 되면 안전사고 발생의 원인이 된다.

산업용 로봇의 재해 대부분이 안전 펜스 안에서 일어나며, 특히 로봇이 운전 중일 때 발생 비율이 높다. 이러한 이유로, 같은 작업 환경 내에서의 공존을 위해 공정별로 영역을 분리하는 것만으로는 안전사고 방지를 완전히 보장하기 어렵다.

2. 협력및협동(Collaboration)

작업자의 예기치 않은 행동에 의해 인간-기계 간의 작업 공간이 겹치는 경우의 안전 확보를 위해 로봇 자체의 안전 기능을 개선하는 것이 필요하다. 협동 로봇이 대표적 사례로, 로봇의 입력 대비 출력 토크 간 관계를 이용하여 협착, 충돌에 의해 과도한 토크가 출력되지 않도록 제어한다.

이러한 협동 로봇을 이용하여 인간-기계 간에 동일한 작업 공간을 공유하고, 각자 공정의 연속성을 확보하는 것을 협력 또는 협동이라 정의한다. 기존 기계 자동화의 경우, 공존에 의해 각자의 작업 공간을 이용한다. 반면 협력에서는 작업 공간을 공유함에 따라, 인간-기계

간의 거리가 가깝고, 공정 간 시간 차가 줄어드는 장점이 있다.

하지만 협력의 정확한 정의에서는 인간-기계 간의 물리적 상호작용, 즉 작업자와 로봇이 중간 제품을 직접 주고받거나, 같은 물건을 동시에 잡는 경우는 고려하지 않는다. 기존의 공존과 비교하면 안전 성능에 따라 좁은 공간에서 제한된 협력은 이루어지지만, 세부 공정이 분리되어 각자의 독립적 작업을 수행한다. 이러한 제약에도 불구하고, 인간-기계가 작업 공간을 동시에 같이 사용할 수 있으므로, 중량물과 위험한 작업은 로봇이 담당하고 작업자는 보다 편한 작업에 집중할 수 있는 방식이다.

현재는 협동 로봇을 이용한 협력의 과도기적 상황으로 협동 로봇의 안전성과 성능에 대한 개선 방안이 있는 실정이다. 임피던스 제어 방식으로 동작하기 때문에 협동 로봇은 토크 센서의 정교함이 필요하며 또한 가속 능력이 상대적으로 낮다. 더불어 대형 로봇이 부족하여 가반 하중 및 작업 공간이 작은 단점이 있다. 또한 협동 로봇을 사용하더라도 툴 선택에 따라 다시 안전 검사를 받아야 하기 때문에 실제 공정을 개발하는 로봇 SI 업체에서 선택에 어려움이 있는 상황이다.

그럼에도 불구하고, 지난 몇 년간 협동 로봇의 보급과 실증 사업이 거듭됨에 따라 협동 로봇의 사용률과 성능 개선이 꾸준히 진행되고 있어 협동 로봇의 전망은 밝은 상태이다.

3. 협업(Cooperation)

협업은 산업용 로봇과 안전 펜스로 분리되었던 공존 문제를 안전 기능이 강화된 협동 로봇으로 협력 관계를 구축함에 따라 등장한 분야이다. 작업자가 로봇을 직접 붙잡거나, 로봇이 공구를 작업자에게 전달하거나, 로봇과 물건을 같이 다루는 식의 물리적 상호작용이 가능한 협력을 의미한다.

공정이 분리되었던 기존 관계와 달리, 인간과 기계가 동시에 동일 공정을 같이 수행하는 것을 협업이라 정의할 수 있다. 협업에서는 안전성이 보장된 협동 로봇의 사용이 필수적이며, 로봇은 작업자의 작업 상황을 모니터링하며 다음 단계를 위한 작업을 동적으로 수정할 수 있다.

물리적 상호작용에 관해서는 대표적으로 협동 로봇의 직접 교시 또한 협업의 한 분야로 볼 수 있다. 로봇의 관절 움직임이 갖는 복잡성에 의해 경로 티칭은 항상 어려운 문제로 손꼽히는데, 협동 로봇의 직접 교시를 통해 사람이 로봇을 직접 붙잡고 움직이면서 경로를 저

장하고 그 이후 재사용할 수 있게 된다.

협업은 대규모 생산시설에 해당하는 자동차 조립 공정에서 먼저 시작되었다. 자동차 부품의 용접 공정처럼 산업용 로봇에 의한 중량물 처리, 빠르고 정확한 움직임이 장점인 분야도 있다. 하지만 부품 조립 공정처럼 무거운 부품의 이송과 함께 작업자만이 수행할 수 있는 인간 특유의 불확실성에 대한 대처 및 섬세함이 요구되는 경우, 협업에 의한 공정 재설계가 전체 생산성 향상에 기여하는 바가 크다.

대표적인 예로 독일의 자동차 트랜스미션 조립 공정을 들 수 있다. 작업자가 가벼운 베어링을 집어넣으면, 5.5kg에 해당하는 무거운 기어를 로봇이 집어넣는다. 이후 작업자가 케이스 뚜껑을 닫으면, 작업자와 로봇이 함께 나사를 조여 완성한다. 이처럼, 작업자의 공정이 끝나는 것을 로봇이 모니터링하여 다음 단계를 시작하거나, 또는 작업자가 증강 가상 환경을 통해 다음 단계의 수행을 손쉽게 지시할 수 있다.

국내에서 사용 중인 단순하지만 효과적인 협업 기반 공정의 사례를 살펴보자. 대형 TV는 후면에 알루미늄 패널이 장착된다. 패널의 흠집, 찌그러짐은 영상 처리로는 검출에 어려움이 있어, 로봇이 패널을 집어서 작업자의 눈앞에 들어 올리면 작업자는 패널을 훑어보고 다시 세부적인 흠집이 있는지 로봇의 이동에 맞춰 검수 공정을 처리한다.

또 다른 경우로는, 일회용 식품인 HMR 제품의 박스 인케이싱 포장을 위해, 작업자가 파우치를 정렬해 놓으면 협동 로봇이 한 번에 들어서 박스에 넣는 단순한 공정도 협업의 일환이다. 작업자는 협동 로봇이 흡착패드로 파우치를 잡지 못하면 제품을 밀어 흡착시켜준다. 기술 수준이 낮은 매우 단순한 작업이지만, 이 또한 협업의 한 유형에 해당한다.

많은 협업 관련 공정의 경우, 인식기와 현대적인 인터페이스에 의해 기술적인 부분이 주로 강조되지만, 협업의 가치는 공정을 어떻게 설계하여 작업자의 부담을 줄여주고 생산성을 올리는가에 달려 있다. 기존의 불가능한 공정을 신기술 도입으로 완전 자동화하는 것은 기술 개발의 측면에서 상당히 중요하다. 하지만 모든 공정을 완전 자동화하는 것은 현실적으로 어려움이 많다. 따라서, 비용과 인식 오류를 고려하여 작업자와 로봇이 공동 작업할 수 있는 협업 분야의 개척과 확장에 대한 중요성이 매우 높다고 할 수 있다.

3. 협업 소요 기술

인간-기계 협업을 위해서는, 로봇을 이용한 공정 설계 및 공정 기술 개발, 작업자 또는 사용자의 상태를 파악하는 지능형 로봇 기술, 서비스 수행을 위한 로봇 자체의 성능과 기능적 기술의 구현이 모두 필요하다. 이처럼 다양한 기술이 요구되는 로봇 분야의 특성을 고려하여, 인간-기계 협업 분야의 전문 인력 양성이라는 전체 사업의 일관성을 유지하고, 동시에 각 대학의 특수성을 살린 중점 분야의 집중 육성을 위한 공통의 협업 소요 기술을 정의, 도출하였다.

협업 소요 기술의 경우, 대분류를 통해 크게 협업 제조 기술, 인간-기계 인터랙션, 산업 지능, 현장 활용 기술로 분류하여 다양한 협업 분야의 연구와 교육 체계를 구성하였다. 여기서는 해당 소요 기술군에 따라, 각각의 기술적 요소와 협업 간의 지향점을 소개하고자 한다.

협업 제조 기술은 기존 제조업의 생산 공정을 기반으로 첨단 로봇 기술을 적용하여 새로운 공정 기술을 개발하는 과정을 의미한다. 다음 그림과 같이 일반적인 제조업의 경우, 원자재 투입, 이송, 가공, 조립, 검수, 포장의 단계를 거쳐 제품을 생산해내는데, 중간 제품의 이송 경로, 가공 방식에 따라 다양한 자동화 및 로봇 기술이 활용될 수 있다. 가공 기술 및 CNC 설비, 장치 간 연동을 위한 통신, 플랫폼 기술, 각 단위 공정을 연계하는 네트워크 구성을 통해 최종 시스템 통합과정이 필요하며, 또한 협동 로봇, 물리적 협력, 파지, 이동 로봇 등의 로봇 기술의 융합을 통해 기존 생산 공정에 대한 협업 기반 자동화 기술의 적용과 기술 개발을 지향한다.



그림 1-1 협업 제조 분야

인간-기계 인터랙션은, 작업자의 안전을 목표로 안전 기술, 협동 로봇 기반의 로봇 제어, 인간-기계 인터페이스, 영상/음성/터치의 멀티 모달 인식 기능을 토대로 구성된다. 영상, 사물 인식에 의한 작업자의 상황과 의도를 인식하고, 예기치 못한 로봇과의 충돌을 예방 또는 완화하는 안전 기반의 협동 로봇 기술, 작업자와 로봇이 협력, 협동해 나가는 다양한 상호작용의 사례와 관련 기술을 다루는 분야이다.



그림 1-2 인간 기계 인터랙션 분야

산업 지능은, AI 기술 및 지능형 로봇 기술을 융합한 AI-로봇 융합 기술을 의미한다. 기존 다양한 기계 자동화 기반의 산업 현장에 네트워크 통신 기반 인프라 구조를 구축하여 가공, 로봇 등의 제조 공정의 자동화, 상황에 따른 변동이 가능한 지능적 생산 관리 시스템의 도입, 작업자의 편의성을 고려한 새로운 인터페이스 등을 일컫는 분야이다.

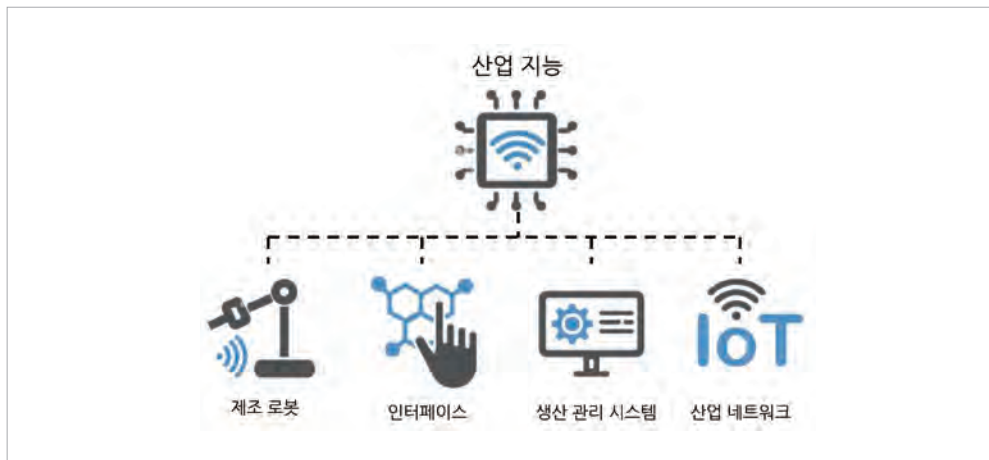


그림 1-3 산업 지능 분야

현장 활용 기술의 경우, 연구 분야와 현장 간의 조화, 실용적 측면의 현장 기술에 대한 이해를 위해 도입되었다. 공정 기술은 현장의 상황에 따른 비용, 공간, 인력 제한 등의 구축 조건과 함께 연구 분야의 최적화, 기능 속도, 인식 성능, 정확도의 한계를 고려하여 개발해야 하는 실사용을 전제로 하는 실용적 분야이다. 산학협력 프로젝트를 통해 학업 현장에 생산한 현장 기술에 대해 배우고 산업을 이해하는 분야에 해당한다.

이러한 네 가지 기술 분야를 토대로 다음 표와 같은 분류 체계를 구성하였다. 각 기술과의 연결 관계를 토대로 74가지의 세부 기술을 도출하고 이를 AI-로봇 기반의 인간-기계 협업의 소요 기술로 정의하였다. 본 과제에 소속된 대학, 참여 기관은 이러한 소요 기술에 근거하여, 각 기관의 장점을 살릴 수 있도록 교육 및 연구 개발을 진행하고자 한다.

표 1-1 AI-로봇 기반 인간-기계 협업의 소요 기술 정의

협업 제조기술				인간-기계 인터랙션			
생산기술	시스템 통합/ 운영	인간-기계 협업	파지/조작/모빌리티	로봇(팔) 제어	HMI	비전 처리	안전기술
공정 분석	네트워크 구성/ 보안 기술	인간-로봇 협업 작업 대응 능력	Pick & Place 작업 설계 대응 능력	로봇 기구/타입 해석 능력	HRI/HMI	2D 영상처리/인식	안전한 구조기구 설계(개선) 능력
생산 프로세스 분석 및 설계	마들웨어 정보 연계 (IoT) 대응	Hand-guiding (직접교사) 작업 대응 능력	Gripper 설계 대응 능력	로봇 시뮬레이션 대응 능력	HMI 인터페이스 설계 능력	3차원 스캔/ 3D 물체 인식	안전을 고려한 전기 설계 능력
비용 효과 분석	이종기간 통신 플랫폼 구축 기술 RS232/485/CAN/ EtherNet/EtherCAT	물리적 접촉/ 상호작용 기반 협동/협업	파지 위치 선정 최적화	F/T 센서 대응/ 임피던스 제어/ 원격 제어	UX 사용성 평가 능력	자세 인식 능력	위험성 평가 능력
공정 설계 능력	ROS 플랫폼 활용/응용	스킴/모방 학습 기반 협업	확률기반 비정형 물체 모델링/ 빈피킹 기술 대응	로봇 선정/자동화 최적화 기술	VR, AR, MR 구성 능력	부정형, 유연개체 (Flexible Objects) 인식 기술	위험성 감소 능력
공정기술/ 자동화 설계	PLC/ SCADA 프로그램 능력	협업 임피던스 제어 기술	멀티 툴 최적화 기술	부가축(여유자유도) 제어 대응 능력	상황/의도 인식 기술	문자 인식 대응 능력	안전 표준 법규
유공장 제어	MES 구축 및 응용	물류 군집 제어 기술	SLAM 기술 대응 능력	제어 프로그램 대응 능력	가공 경로 생성/ 최적화 기술	바코드(2차원) 대응 능력	인간공학 대응 능력
Conveyor 주적 대응 능력	임베디드/ 제어기 프로그래밍	데이터기반 고장 진단/예측 기술	AGV/LGV 자율 주행 설계	경로 설계/ 티칭 대응 능력	영상/음성/터치 멀티모달 인터페이스 기술	딥러닝 기반 영상 처리/ GAN	안전 사고 방지 센서 기술
CNC/머신텐딩 응용 기술	실시간 분산 제어 프로그래밍	VR 기반 제조공정 솔루션/기술	장애물 회피 기술	장애물 회피/ 최적경로 생성	대화 관리/ 챗봇 기반 인터페이스 설계	사용자/물체 추적 기술	안전 사고 예측/진단 기술
융합 자동화 기술 (확인 필요)	스마트 팩토리 통합 운영	협업 모델링 설계 능력	모바일 매니플레이터 시스템 운영 기술	모션 컨트롤 대응 능력	웨어러블 센서/ 외골격 장비 설계	Visual Cueing/ Visual Context 학습화 방법론	안전사고 진단/관리 관제 시스템
품질관리 지능	기계시스템 제조공정 관리/관제 시스템	인식 지능	로봇안전 지능	Teach-less 로봇 시스템	협업 지능	제어 지능	로봇 자동화 공정 설계 능력
							로봇 및 자동화 실무 능력 배양
							전력/공압/통신 현장설비 설계능력
산업지능				현장활용 기술(산학 협력)			

3.1 협업 제조 기술

협업 제조 기술은 제조 및 생산에 필요한 로봇 기술로 구성되어 있다. 공정 및 서비스 개발을 위해 필요한 로봇의 기능적 요소를 소분류로 생산 기술, 시스템 통합/운영, 인간-기계 협업, 파지/조작/모빌리티의 네 가지 유형으로 나누었다. 각각의 소분류 기술을 통해 협업 제조 기술의 의미와 필요 기술군을 배치하고자 한다.

3.1.1 생산 기술

제조 분야에서의 공정 개발, 공정 관리, 공정 기술 등의 생산 기술 분야와 함께 로봇 시스템 통합(SI)을 위해 필요한 현장 지원 기술을 포함한다. 제조업의 경우, 로봇 자동화의 도입 및 개발을 위해서는 사전 검토 작업이 필수이다.

현재 설비 및 작업자 투입에 따른 공정 및 세부 공정을 분석하여 로봇 자동화를 통한 성능 지수 분석, 경제적 손익, 예상 비용을 도출하는 것이 필요하다. 공정 개발을 위해서는 세부 공정 기술의 분석, 설계를 통해 로봇을 활용한 자동화의 가능성 및 사전 테스트 과정이 필요하다. 이론 및 연구 분야와 달리, 실 환경에서의 로봇 활용에 초점을 맞춘 현장 기술의 경우,

유공압 제어, CNC 머신 운영 등의 현실적 주제도 포함된다.

유공압 제어는 최근 학교 교육에서 제외되고 있으나, 산업 현장에서의 활용도가 높기 때문에 기초적인 유공압 회로의 이해 및 각종 소자의 사용 방식에 대한 소개, 실습 과정들이 필요하다.

로봇 자동화의 한 분야인 머신 텐딩은, CNC 장비와 연동하여 로봇에 의한 반가공품의 투입과 가공, 배출을 통해 단순 반복적인 가공 과정을 자동화하는 방식이다. CNC 장비의 가공 특수성을 이해하고, 가공 순서에 따른 지그, 정렬의 중요성을 이해할 수 있다.

공정의 설계 과정에는, 기존의 사이클 타임 및 택 타임에 맞춰 예상 생산량 도출, 로봇의 가반 하중, 작업 공간, 속도에 따른 기종 선택 등이 필요하다. 이를 위해 공정 시뮬레이션을 거쳐 최종 산출물인 신공정의 가능성을 타진한다.

3.1.2 시스템 통합/운영

작업자와의 협업 대상인 로봇, 자동화 기기는 다양한 센서, 장치의 하드웨어 요소와 함께 제어, 지능형 모듈, 인식기로 구성된 시스템 분야이다. 다양한 기능 구현을 위해서는 여러 모듈 간의 정보 처리를 위한 시스템 통합이 필수적이다. 최근 로봇 자동화를 위한 로봇 시스템 통합, SI를 주요 로봇 산업군으로 분류하고 있으나 이러한 제조 설비 분야의 SI와 달리, 로봇 분야에는 장치와 기능의 정보처리 관점에서의 시스템 통합이 오랜 기간 문제시되어 왔다.

이를 크게 로봇 자동화 SI와 로봇 개발 SI로 분류하여 설명하고자 한다. 전자인 로봇 자동화의 SI는, 공정의 이해에 따라 로봇을 어떻게 활용하는가에 달려 있고, 후자인 로봇 개발 SI는 로봇의 기능이나 새로운 로봇을 개발하는 과정에서의 모듈 간 통합에 초점이 맞춰져 있다.

로봇 자동화의 SI 분야는 생산에 요구되는 물리적 환경, 기술적 문제를 분석하여, 기존 수작업에 의존하던 공정 방식을 로봇 자동화 형태로 재설계하는 것을 의미한다. 다양한 제품을 생산하는 제조 분야의 기존 방식을 수정, 변경하기 위한 공정 설계 및 기술 개발에 초점이 맞춰져 있다.

로봇 개발의 SI 분야는 로봇의 기본적인 하드웨어부터 소프트웨어에 이르는 전 과정의 기능 통합과 정보처리 과정의 시스템 통합이다. 로봇 하드웨어의 기본인 센서, 모터의 제어를 위한 제어기 연결, 통신, 실시간성에 대한 이해와 로봇의 크기, 허용 중량, 최대 속도, 정확도

및 정밀도, 지능형 모듈인 영상 처리, 자율 주행, 인식기 설계 등이 모두 포함된다.

본 교육 과정에서는, 로봇 자동화 SI는 생산 기술 분야에서 담당하고, 시스템 통합에서는 로봇 개발에 따른 SI를 의미한다. 따라서, 시스템 통합은 로봇 시스템 구성을 위한 모듈, 장치의 기본 성격의 이해와 통신/네트워크 구성과 함께 효율적인 프로세스 및 생산량 관리, 데이터 활용 방식을 습득하여 다양한 개발상의 문제점 해결 능력을 배양하는 것이 목표이다.

최근 시스템 통합은 기술 고도화가 진행됨에 따라 특정 기술군에 대한 프레임워크 개발을 통해 확장성과 일관성이 강화되고 있다. 영상 처리용 OpenCV나, 리눅스 환경에서의 모듈 간 연결 편의를 지원하는 ROS, GitHub와 오픈소스를 통한 프레임워크의 확산이 이에 해당한다.

로봇 개발의 SI를 위해 필수적인 네트워크 통신 분야, 모듈 간 통합 편의를 위한 미들웨어, 산업 현장의 수요가 높은 PLC, SCADA, 실시간성에 대한 이해와 분산 처리 기술 등으로 구성되며, 이러한 기술의 통합, 관리에 대한 스마트 공장 기반의 실증, 사례 연구들이 포함된다.

3.1.3 인간-기계 협업

인간-기계 협업의 광의적 의미와 구별하여 협업에 필요한 실질적 세부 기술을 정의하였다. 제조, 서비스 분야에서 요구되는 인간-기계 또는 로봇 시스템 간의 상호 협력 관계에 필요한 기술들로 구성하였다.

작업자와 로봇이 제한된 공간 내에서 활동하기 때문에, 충돌, 협착 등의 물리적 접촉에 따른 안전 확보에 어려움이 있다. 또한 작업자의 동선 변경, 움직임에 따라 로봇이 실시간 적응하며 경로를 동적으로 생성해내는 기능이 필요하며, 로봇이 협업에서의 문제점을 자체적으로 파악하여 안전사고를 방지하고 작업자에게 알림을 보내는 기능이 필요하다.

안전 확보를 위한 협동 로봇의 사용과 함께, 부착된 도구를 포함한 안전한 협업 기능의 구현이 요구되어 임피던스 기반의 물리적 상호작용 기술, 비정상적인 동작에 의한 안전사고 감지를 위해 로봇 및 시스템 자체의 고장 진단/예측 기술, 협업과정에서 공정의 오류를 감지하기 위한 검수/검사 기술, 가상 환경을 통해 공정 설계, 다수 로봇으로 구성된 협업 시스템의 협동/협력 기술, 로봇의 움직임을 동적 생성하거나 작업자가 쉽게 티칭할 수 있는 모

방학습 등의 기술로 구성되었다.

3.1.4 파지/조작/모빌리티

작업자와의 협업을 위해서는 기존의 산업용/협동 로봇과 달리 로봇 자체의 우수한 성능이 요구된다. 협업 공간에서는 작업자 안전을 위해 기존의 전용 피더에 의한 로딩보다는 협동 로봇을 이용하는 것이 바람직하다.

예를 들어 효과적인 협업 모델로 언급되는 디버링 공정의 경우, 위험한 작업은 로봇이 수행하고 복잡한 형상 인지는 작업자가 나누어 처리할 수 있다. 이러한 협업 공정에서 로봇은 대상을 정확히 인지하고 파지하는 조작 능력의 우수성이 요구된다. 중량물의 이송 또한 로봇 활용의 좋은 사례이다. 산업 현장은 복잡한 시설물이 많으며, 이송, 적재가 빈번히 발생하는 환경이다. 이러한 환경에서 자율 주행하는 이동 로봇을 이용한 중량물 이송, 작업자 및 장애물 회피, 모바일 매니퓰레이터처럼 이동과 조작 성능을 갖춘 다목적 로봇의 활용은 생산성 향상에 기여하는 바가 크다.

파지는 로봇 분야에서의 중요도에 비해 교육 과정으로 적용하기 어려운 분야이다. 전통적인 전용 그리퍼의 설계, 멀티툴 활용 등의 내용과 함께 최근의 부정형 물체 파지 및 위치 선정 최적화 등 다양한 파지 분야의 기술 습득을 목표로 구성되었다.

이동 로봇 분야는 최근 물류 분야의 로봇 활용률이 증가하여 산업화가 급격히 진행되고 있는 로봇 분야 중 하나이다. 많은 로봇 분야가 모델링 기반 방식을 적용하고 있는 반면, 이동 로봇은 확률 기반의 지능형 로봇 연구 분야에 속한다. 이동 로봇의 주행과 위치 인식 문제를 다루고, 산업용으로 활용되고 있는 AGV부터 SLAM 기반의 LGV까지 대학별 교육 환경에 맞춰 주제 편성이 가능하다.

이와 함께, 스마트 공장의 관심과 함께 주목받는 로봇으로는 모바일 매니퓰레이터가 있다. 자율 주행과 조작의 편의성을 동시에 추구함에 따라, 위치 정확도의 확보와 정렬에 대한 연구 및 실 환경 적용의 문제해결이 요구되는 분야이다.

3.2 인간-기계 인터랙션

인간-기계 협업에서는 작업자와 로봇이 동일한 공간에서 공존 및 협력 관계를 유지하기 위해 필요한 안전 기술, 작업자 및 작업 진행을 인식하기 위한 영상 기반 기술, 가상/증강/

체감형 환경을 통해 작업 진행 상황을 전달하여 작업자의 판단을 돕는 비언어 대화 방식의 인터페이스 기술, 로봇 팔의 최적 위치, 경로 생성, 부가축 및 여유 자유도 문제를 통한 다관절 로봇 관련 기술로 구성된다.

로봇은 작업자의 의도와 주어진 상황을 이해하여, 안전을 기반으로 인간과의 자연스러운 상호작용을 이루는 것을 목표로 한다. 이러한 상호작용 기술은 협업에 특화된 모델링과 로봇 시스템의 설계와는 다르게 주어진 상황에 대한 인식과 반응에 중점을 둔다. 인간과 기계, 두 에이전트의 선택에 따라 다양한 사례가 발생하기 때문에, 작업자의 안전을 최우선시하는 상호작용 모델의 개발이 매우 중요한 분야이다.

3.2.1 로봇(매니퓰레이터) 제어

로봇 팔은 이동 로봇과 함께, 로봇 분야의 대표적인 하드웨어에 해당한다. 특히 제조 분야에서 공정 자동화 대부분이 로봇 팔을 이용하므로, 로봇 팔의 기구적 움직임과 부착 위치, 경로 설계의 중요성이 높다. 특히 다수의 회전 관절로 이루어진 수직 다관절 로봇이 많이 쓰이기 때문에 회전축의 배치에 따른 유형에 따라 움직임에 차이가 크게 된다.

이러한 수직 다관절 로봇의 기구적 움직임은 오랜 기간 연구되어왔음에도, 축의 회전을 사용하는 방식 때문에 구속 조건, 태스크 중첩, 부가축에 의한 여유 자유도 활용 등의 다양한 문제점에 대한 해결 능력이 요구된다. 기본적으로 위치에 기반을 둔 움직임을 갖지만, 주어진 태스크에 따라 힘/토크 센서를 이용한 제어 방식이 요구된다.

로봇 팔은 많은 산업 분야의 다양한 요건을 충족하기 위해 가반 하중의 증가, 높은 가속 능력을 갖춘다. 최근 3차원 영상 장비의 활용이 증가하면서, 로봇 팔과 영상 간의 정확도 향상 및 위치 보정의 필요성이 증가하고 있다.

로봇 팔의 경로 문제는 최근 가장 부각되고 있다. 기존의 경로 설계 방식을 포함하여, 협업에서는 작업자 상황에 따른 경로의 동적 생성과 장애물 회피, 최적 경로 생성의 중요성이 높다. 로봇 팔은 자세 및 부하에 따라 기구적, 동적 특성이 달라지기 때문에 움직임에 대한 이해와 실습이 필요하다. 작업자와 로봇 또는 다수 로봇 간의 협업은 태스크의 변화와 중첩이 발생하기 때문에 실습을 통한 경험 축적과 함께 이론적 보완이 필요한 부분이다.

3.2.2 HMI

HMI는 인간-기계 인터페이스(Human- Robot Interface)로, 기계를 켜고 끄는 배전반과 스위치로부터, 정보의 표기와 사용자의 터치 입력을 위한 터치 모니터, 가상 환경과 증강 정보를 통해 공정 상태를 표기하는 VR/AR/XR 인터페이스, 자연어 처리에 기반한 챗봇, 신체 접촉용 웨어러블 장치까지 다양한 유형과 기능이 있다.

이러한 장치적 측면 외에 작업자의 사용에 대한 경험을 분석하고 편의성과 효율성을 측정하는 UX 분석 및 사용성 평가가 있다. 사용성 평가는 사용 시간, 횟수 등의 물리적 평가 항목과 함께 사용성에 대한 설문을 통한 정성적 평가로 구성된다.

이러한 장치 및 사용성 측면과 함께, 사용자의 의도, 상황 해석을 위한 영상/음성/터치/제스처 등의 멀티 모달 정보기반의 인식기 개발이 포함된다. 사용자의 의도는 단일 정보(Text)에 대한 인식 성능과 함께 전후 맥락(Context)을 파악하는 것이 중요하다. 협업에서는 작업자와 로봇 간의 비언어적 대화일 가능성이 크다. 작업자는 작업을 위해 손을 사용하는 경우가 많고, 도구를 들고 있는 경우 손을 이용한 터치와 버튼 활용에 어려움이 많기 때문에 작업자의 제스처 등 직관적인 비언어 대화기의 구성이 바람직하다. 반면 로봇의 경우, 언어식 대화를 위한 TTS(Text-To-Speech)와 STT(Speech-To-Text) 방식의 사용도 가능하나, 많은 산업 환경에는 앰비언스 노이즈가 있고, 다른 유사 작업자 또는 로봇의 말을 잘못 알아들을 수 있기 때문에 되도록 비언어식 대화가 유리한 측면이 있다.

3.2.3 비전 처리

협업 환경에서 영상 인식의 중요성은 매우 높다. 작업자의 작업 현황을 영상으로 판단하여 로봇은 먼저 작업을 종료하고 대기할 수 있고, 불량에 대한 부분을 자체 판단하여 작업자에게 알리거나, 복잡한 부정형 물체를 파지하기 위한 위치 정보를 제공하는 것, 고속으로 이동되는 물체의 영상 기반 검수 작업 등 활용도가 매우 높은 기술이다.

영상 처리의 경우, 2차원 영상 처리, 3차원 멀티 뷰 기반 기술, 3차원 스캐너 기반의 포인트 클라우드 처리로 크게 분류된다. 2차원 영상 처리의 경우, 전자 부품, 보드와 같이 비교적 높이가 낮은 제품군의 조립, 정렬 분야에 활용도가 여전히 높다. 최근에는 QR 코드를 이용한 위치 및 깊이 정보 추출을 이용한 정렬 사례가 많으며, 이동 로봇의 도킹 및 위치 정렬 또

한 이러한 영상 처리 기법에 포함된다.

3차원 영상 처리의 경우 최근 포인트 클라우드를 이용하여, 기존 영상 처리에서 처리하기 어려운 작업을 새롭게 처리하며 영향력이 대폭 증가하는 추세이다. 또한 포인트 클라우드를 이용한 작업자의 스켈레톤 정보 취득과 제스처 판단이 보편화되어 있으며, 실시간 스캔을 통해 실제 작업 환경을 가상 공간 내로 디지털 정보화시키는 디지털 트윈 기술, 자율 주행의 위치 인식 기능과의 결합 등 활용도가 높다.

최근의 영상 처리는 딥러닝을 이용한 인식률 향상에 힘입어 AI 기술의 주요 활용 영역으로 고려된다. CNN과 텐서플로우 기반 RNN의 활용도가 높아 산업분야로의 진출이 빠르게 가속화되고 있다. 이동 로봇의 경우도 스캐너 기반의 거리 정보에서 ORB 특징점 기반의 SLAM으로 빠르게 전환되고 있으며, 사물 인식 분야는 기존 방식을 벗어나 딥러닝 분야로 크게 이동했다고 할 수 있다.

3.2.4 안전 기술

안전은 협업의 전제 조건이라 할 수 있다. 작업자의 안전을 보장할 수 있어야 협업의 설계 자체가 가능하기 때문에, 안전과 관련된 다양한 조건과 표준안이 등장하고 있다. 로봇 분야의 대표적인 표준은 ISO 13482로써 로봇의 안전관련 인증절차, 규격 등이 정의되어 있다.

협업 시스템의 설계에서는 로봇의 빠른 속도, 가반 하중, 자동화 성능, 인식 확률 등의 로봇의 주요 성능보다는 안전을 최우선으로 만족하는 것이 중요하다. 로봇의 활용을 위해서는 ISO 13482 표준안과 산업 안전 보건법에 의해 안전 인증 절차가 기본적으로 요구되고 있으며, 중대 재해법 시행 등 작업자의 안전에 대한 당사자 및 정책적, 사회적 요구가 지속적으로 상승하고 있다.

이러한 안전 기술에는 기존의 빠르고 강한 로봇의 성능보다는 작업자 안전을 우선시하는 설계자의 철학이 가장 중요하다. 또한 세부 기술에서도 구조, 기구, 툴 등 작업자의 안전을 고려함과 동시에, 해당 공정의 위험성 평가를 통해 작업자의 작업 난이도를 조절하는 것이 필요하다. 로봇의 교육, 실습 과정에서부터 이러한 안전 사항을 준수하고, 실험실 내의 로봇 사용부터 안전 기준에 적합한지 여부를 평가하는 것이 바람직하다.

이처럼 설계, 적용 측면에서 안전을 과도하게 강화한다고 해도 불가피하게 안전사고가 발생할 수 있다. 이러한 사고 방지를 위해서는, 센서를 활용하여 작업자 안전을 지속적으로 모

니터링하거나, 데이터 추출이 용이한 로봇 시스템의 특성을 이용하여 실시간 데이터 수집을 통한 안전사고 예측/진단 기술의 활용 등이 가능하다. 로봇의 경우, 구동기 교체에 많은 시간이 소요되기 때문에 사전 고장 진단을 통해 유지/보수하는 진단 시스템이 개발, 활용되고 있다.

3.3 산업 지능

최근 AI 분야의 진전과 활성화에 따라, 로봇과 AI를 연계하는 융합 응용 분야가 각광받고 있다. 로봇 분야에서는 로봇 팔, 영상 인식, 이동 로봇, 상호작용 분야를 융합하여 지능형 로봇 기술로 불려왔으나, 이제는 AI 기술을 본격 활용하는 새로운 시기에 진입하고 있는 실정이다. 이에 따라, 기존 산업용 자동화 분야와 AI 기술이 합쳐진 산업 지능에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이를 7개 항목으로 분류하여, 앞선 협업 제조 기술과 인간-기계 인터랙션 분야와의 필요에 따른 융합을 고려하고자 한다.

산업 지능을 분류하면, 크게 품질 관리 지능, 기계시스템 제조공정 및 관리/관제 시스템, 인식 지능, 로봇 안전 지능, Teach-less 로봇 시스템, 협업 지능, 제어 지능으로 구분한다.

품질 관리 지능은 제품 제조 과정의 문제점을 해소하고 가공 정밀도의 유지, 도구의 수명 관리 등 가공 전반에 걸친 제품의 품질을 유지하기 위한 지능형 자동화 공정을 의미한다. 또한 포장, 이송의 전 단계로 제품의 검수/검사 공정의 자동화도 포함된다. 제조에 따른 제품의 품질을 유지하기 위해, 각 공정별 데이터베이스의 수집, 가공 방식에 따른 수율 관리 등의 제조 분야와 함께 작업자 동선, 작업 능률 요소 등 MES와 ERP를 통해 수집된 정보를 효율적으로 처리하는 것이 필요하다.

기계 시스템 제조 공정 및 관리/관제 시스템은, 스마트 공장의 보급과 함께 MES, ERP, SCADA 등 각 공정의 디지털 정보를 수집, 관제하는 제조 전반의 관리 시스템을 의미한다.

MES는 제조 실행 시스템(Manufacturing Execution System)의 약어로서 제조 실행 또는 통합 생산 관리 시스템을 말한다. 생산 계획과 실행 간의 차이를 줄이기 위해 현장의 각종 정보를 취합하여 설비 운영 및 상황에 따른 다양한 의사 결정을 지원하는 시스템이다. MES는 공정 진행 관제, 설비 제어, 품질 관리 정보, 자재 관리, 인력 관리 기능을 포함하며, 공정간 생산량을 조절하여 인력, 비용, 장비를 효율적으로 사용하여 최종적으로 기업의 생산성 향

상 및 원가 절감을 목표로 한다.

SCADA는 기존의 자동화 장비가 서로 다른 규격과 수동식 조작에 의존하던 것을 감시 제어와 데이터 취득이 용이하도록 네트워크 기반으로 통합 처리하는 산업 제어 시스템을 말한다. 앞선 MES, SCADA를 합쳐 데이터 저장, 시설 모니터링, 설비 유지를 통한 스마트 공장의 1단계화를 진행할 수 있다.

인식 지능은 영상, 터치, 음성 등의 모달 정보를 이용한 인식기를 개발하여 각 공정의 자동 검수를 통한 자동화의 중요한 기능 중 하나이다. 앞서 인간-기계 인터랙션의 비전 처리 및 안전 센서 등을 포함하여, 각종 자동화 설비의 공정 단계별 작업 진행과 안전사고 예방을 위한 인식 기능을 포괄하고 있다. 인식은 기존 버튼식 명령과 달리 감시 제어가 가능하며, 제품의 품질 검사, 협업의 단계별 판단과 함께 상위 수준의 상태 모니터링 정보의 제공에 주요한 기능이다.

로봇 안전 지능은 앞서 인간-기계 인터랙션의 안전 기술과 결합하여 생산 현장 전체의 안전 지능 설비를 포괄적으로 의미한다. 로봇의 경로 이동에 따른 충돌, 협착 문제, 장애물 회피 등 로봇이 사용되는 공정상의 작업자 안전 문제뿐만 아니라, 공정의 연계 과정에서 발생할 수 있는 로봇 공정과 직접적 연관이 없는 물류, 이송 시의 안전 상황, 작업자 낙상 등의 사업장 안전사고 발생에 관한 사항을 모두 포함한다. 로봇 기술이 활용되는 안전 센서를 토대로 팔레트의 이송에 사용되는 지게차의 협착 사고, 자동 도어 개폐, 산업 환경 내의 환기, 온도 관련 공조 시스템 등 산업 현장 전체 안전 시스템의 관리, 관제를 포함한 정의이다.

Teach-less 로봇 시스템은 기존의 모델링과 경로 설계에 기반한 로봇 시스템과 달리, 주어진 문제에 대한 데이터와 학습을 통해 로봇에 의한 자동 경로 생성, 로봇의 스킬 단위 학습에 따른 현장에서의 공정 재설계, 작업자가 손쉽게 경로 티칭을 할 수 있는 방법론 등을 포함한다. 이처럼 크게 학습과 인터페이스의 변화를 통해 로봇의 경로 설계 및 티칭의 편의성을 제공하여 현장 적응형의 로봇 시스템을 운영하는 기술을 지칭한다. 도장 로봇과 같이 단순히 정해진 영역을 자동으로 도색하는 경로를 생성하는 방식이나, 로봇의 단위 움직임에 대한 스킬 학습을 통해 복잡한 경로나 작업자의 상위 수준 티칭에 대응 가능한 기술로 구성된다.

협업 지능은 기존의 로봇 자동화인 오퍼레이터 2.0, 3.0 시대를 거쳐 기계에 의한 보조 역

할이 가능한 오퍼레이터 4.0 시대의 협업에 중점을 두고 있다. 기존의 모델링 위주의 협업과 달리, 로봇이 작업자와의 협업을 위해 고려할 공정상 문제, 기술적 요소, 동적인 특성을 종합하여 로봇의 다음 동작을 정의할 수 있다.

협업 지능은 작업자 중심의 협업 모델에 기반을 두기 때문에 로봇이 독자적 행동을 수행하는 완전 자동화를 배제하고 작업자의 판단을 통해 협업을 진행하지만, 작업자의 실수나 잘못된 판단에 대한 경고, 에이전트의 실수에 의해 지연된 세부 공정의 실시간 최적화를 통한 보정 등 협업의 적절한 완수를 위한 지능적 요소를 의미한다.

제어 지능은 로봇의 다중 태스크 처리와 최적화 분야, 부각축이나 여유 자유도를 통한 경로 최적화, 좁은 환경에서의 장애물 회피 및 경로 최적화 등 경로 제어와 관련된 기술을 의미한다. 기존의 로봇 제어 및 경로 프로그래밍 방식과 달리, 협업에서는 작업자의 상태에 따라 다양한 사례가 발생하기 때문에 작업자의 지시나 대기과 달리 로봇이 주어진 태스크 범주 안에서 경로 제어 및 최적화를 통해 적응적 판단을 수행할 수 있다. 이는 프리 프로그래밍에 의한 로봇의 완전 자동화와 달리, 협업 내의 정해진 태스크 범주 안에서의 적응형 기법으로, 실시간 최적화를 통해 작업자와의 안전사고를 방지하며 협업의 효율을 높이는데 중점을 둔다.

3.4 현장 활용 기술

현장 활용 기술은 연구 및 이론적 분야와 달리 실제 실무과정에 유용한 경험과 필요 기술 군에 대한 내용으로 설정되었다. 크게 로봇 자동화 공정설계 능력, 로봇 및 자동화 실무 능력 배양, 전력/공압/통신 현장 설비 설계 능력으로 구성된다.

로봇 자동화 공정설계 능력은 로봇을 이용한 공정에서 흔히 볼 수 있는 정렬 지그의 활용부터 반전기, 컨베이어 활용 등 주변 기기와의 조율을 통해 원하는 공정을 설계할 수 있도록 하고, 효율과 비용을 고려한 공정 설계 및 세부적인 공정 기술의 함양에 목적이 있다. 교육 현장에서는 설계 단계부터 경제성을 고려한 최적화된 공정 설계를 경험하는 데 한계가 있다. 따라서 산학 협력을 통해 이러한 공정 설계 능력과 함께 실제 현장에서의 공정 기술 개발 현황에 참여 및 경험하는 데 중점을 둔다.

로봇 및 자동화 실무 능력 배양은 구축된 로봇 장비만을 활용하는 교육 현장과 달리 다양

한 로봇의 사용과 특성을 고려한 활용 방안에 초점이 맞춰져 있다. 마찬가지로 학교 내의 교육보다는 산학 협력을 통한 경험을 축적하는 것이 가장 유리하며, 또는 로봇직업교육혁신 센터처럼 다양한 산업용 로봇을 보유한 기관 내 교육 이수를 통해 제조사별 로봇의 특성 파악 및 경로 프로그래밍 능력을 확보하는 것이 필요하다.

전력/공압/통신 현장 설비 설계 능력은 실제 로봇 자동화 산업 현장에 필요한 컨베이어 라인 구축과 공압 밸브, 안정기의 활용과 공압량 조절 및 배치, 전력 및 통신 회선 설치 등 로봇 자동화 이면의 주변 장치 설비와 설치 과정을 경험하는 것을 말한다. 산업용 전력의 활용과 스위치 제어, 유공압 설비 구축과 컴프레서 운용, 통신 회선의 배치 및 사용자 인터페이스 설치 등의 실무적 문제점을 산학협력을 통해 이해하고 습득하는 과정이다.

2

산업 프로세스와 산업 지능



1. 개요

2018년 가장 많은 제조산업 내 작업자 대비 로봇을 다수 보유한 나라는 대한민국이었다. 그림 2-1은 인구 대비 로봇 수를 나타내는 통계이다. 고용인구 만 명당 제조 시스템 안에 있는 로봇 수를 나타낸 결과이다. 다음 통계는 인터내셔널 회사로 글로보틱스에서 2018년에 나타낸 결과이며, 각 국가마다 산업용 로봇이 얼마만큼 집중되어 있는지 밀도를 나타낸 결과라고 할 수 있다. 그림 2-1에서 보는 것 같이, 대한민국은 대부분의 제조 시스템에서 다수의 산업용 로봇을 활용하고 있다. 따라서 이러한 현실을 반영하면 산업용 로봇의 지능화가 아주 큰 응용 분야라고 할 수 있다.

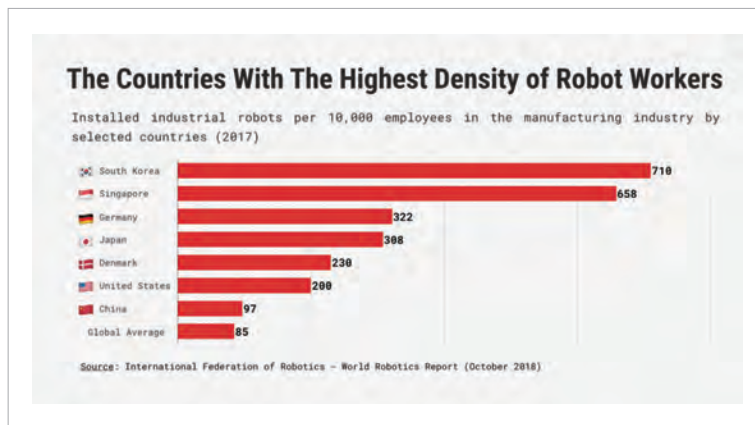


그림 2-1 국가별 제조업 고용인 10,000명당 산업용 로봇 설치 대수(2017년) [1]

그러나 이러한 압도적인 통계는 일상생활에서 잘 드러나지 않는다. 이는 대부분의 산업용 로봇이 제조 환경 내에서만 사용되기 때문이다. 그만큼 제조 환경은 아주 높은 밀도로 산업용 로봇이 활용되는 분야라고 할 수 있다. 이렇게 산업용 로봇이 활발히 활용되는 이유는 제조 시스템의 정규화 되어 있는 동작을 지속적으로 반복하는 특징과 제조 현장이 일정한 프로세스로 계속 움직일 수 있는 특징을 가지고 있기 때문이다. 또한 제조 환경은 정해진 프로그램에 따라 움직이면서 이윤을 창출하는 구조이기 때문에, 이러한 시설에 로봇과 같은 값비싼 시설투자가 가능하기 때문이기도 하다. 이러한 이유로 제조 시스템은 산업용 로봇 적용에 있어서 가장 첫 번째로 살펴보아야 할 응용 분야라고 할 수 있다.

한편, 협동 로봇이 가장 많이 사용되고 있는 산업 분야는 역시 제조 생산 현장이다. 이러한 제조 환경에서 인공지능을 사용하기 위해서는 현장 요구 사항에 맞는 정확한 응용 분야를 찾는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 제조 현장에 적용되는 로봇은 하나의 시스템을 이룰 수 있도록 생산 환경과 알맞게 구성되어 있다. 이러한 산업용 로봇은 일찌감치 공장 현장에 사용되고 있었으며 유연 생산 방식(Holonic Manufacturing, Reconfigurable manufacturing) 그리고 스마트팩토리까지 널리 활용되면서 생산 시스템과 함께 계속 진화하고 있다. 본 장에서는 협동 로봇이 가장 활발하게 사용되고 있는 제조 시스템에 대해서 설명하고 이러한 제조 시스템이 어떻게 변화되어 왔는지 그 프로세스와 함께 이해하는 동시에, 이 현장에 적용하기 위한 인공지능 적용방법론에 대해서 두 가지 큰 접근 방법들을 언급하도록 한다.

2. 산업 프로세스

본 장에서는 크게 두 가지 산업 프로세스에 대해 살펴보고, 산업 인공지능 적용에 대해서 설명하고자 한다. 특히 산업 프로세스에서는 기존의 생산 시스템에 대한 이해를 위해서 유연 생산 시스템부터 스마트팩토리까지 발전 과정들을 설명하도록 한다. 이때 개별 생산 시스템 개념들이 강조하고 있는 특징점과 구성요소들을 정리하고 관련 용어들에 대해서 설명하고, 마지막으로 이러한 시스템들을 운영하기 위한 시스템 아키텍처에 대한 설명을 추가하

였다. 유연 생산 시스템은 셀 기반의 워크스테이션 방식에 따라 구축하고 있으며, 무엇보다도 레이아웃 디자인에 있어서 자동화와 다품종 소량에 최적화되어 있다. 동시에 수행할 수 있는 작업을 함께 최적화하기 위해서 간판 시스템이나 Group technology를 이용함으로써 생산성을 높이고 설비투자를 줄인다. 다음으로 Holonic manufacturing에서는 Holon이라는 개념을 도입하여 모든 생산 시스템의 구성요소들이 스스로 판단하고 계획하고 운영할 수 있는 특징을 가진 존재로 구성한다. 이 Holon들은 서로 협력하고 연결하고 통합되어서 하나의 목적을 이루게 되는데, 이러한 관계들을 운용하기 위한 아키텍처로 특히 제조 시스템에 맞춰진 PROSA 아키텍처를 소개한다.

Reconfigurable manufacturing에 대해서는 첫 번째로 조립라인의 대한 여러 가지 문제점들을 제시하고, 이러한 문제점들과 생산시설의 비용과 제품의 다양화를 모두 해결하기 위한 솔루션으로 등장한 재구성 가능한 공작기계에 대해서 설명한다. 이러한 재구성 가능한 공작기계는 모듈형 방식의 시스템을 도입하고 있는데, 이러한 방식을 통해서 제품의 다양성에 대해 어떻게 대응하는지 정리하도록 한다. 마지막으로 스마트팩토리가 도입된 이유로 앞서 이야기했던 Holonic 그리고 Reconfigurable의 특징을 지닌 사이버-물리 제조 시스템에 대해서 설명한다. 이러한 시스템들은 재구성도를 극대화한 형태를 띠고 있는데, 특히, 스마트팩토리에서는 사이버-물리 시스템을 도입함으로써 이러한 개별 모듈들이 진정한 Holon으로 구현될 수 있도록 기술들을 제공한다. 이런 스마트팩토리는 단순히 기술적 측면이 아니라 제품에 Batch-size One과 같은 극단적인 다품종 소량을 이룸으로써 도심형 공장을 가능하게 하기 위한 목적을 가지고 있으며, 이를 실현하기 위한 전략적 그리고 시장 요구에서 등장했다고 할 수 있다.

3. 유연 생산 시스템

첫 번째로 유연 생산 방식은 기존의 기계들을 하나의 독립적인 존재가 아니라 여러 개의 프로세스로 연결할 수 있도록 이송 장치들을 통해서 다양한 형태의 셀 워크스테이션 단의 물류를 만들어내는 시스템이 되겠다. 이러한 이송 장치는 기계 간 또는 다른 셀 간에 프로세

스를 연결해 주는 역할을 하는데 이때 기계 간에 인터페이스를 하기 위해서 팔렛을 도입하게 된다. AGV를 통해서 공작기계와 보다 더 정교하게 그리고 빠르게 그리고 자동으로 연결시킬 수 있다. 이때 각 작업물들을 안전하고 자동으로 다루기 위해서 자동화된 작업물 핸들링 시스템과 자동화된 저장 시스템들을 도입하게 된다. 이러한 물류시스템을 통해서 워크스테이션들을 보다 효율적으로 그리고 자동으로 작동할 수 있도록 한다.

전체 생산 라인 시스템들을 제어하기 위해서 컴퓨터 기반의 자동제어 시스템이 구축되어야 한다. 또한 여러 종류의 워크스테이션들이 동시에 서로 다른 제품 모델들을 처리할 수 있도록 요구의 변화 패턴에 맞게 정확하게 대응할 수 있는 최적화 시스템도 필요하다. 자동화된 시스템들은 다량의 유사 제품들을 빠르게 생산할 수 있는 장점을 갖고 있다. 한편, 유연생산 시스템은 복잡한 자동화 시스템들을 대규모로 구축해야 하기 때문에 구축 설비 측면에서는 고가의 시스템이라고 볼 수 있다. 이런 유연 생산 시스템을 적용하기 위한 대상으로는 셀 기반 워크스테이션 방식의 제조방식인 경우에 가능하다고 할 수 있다. 셀 방식은 여러 개 워크스테이션으로 구성되어 있으며 이러한 워크스테이션에서 하나의 프로세스를 처리하게 된다. 워크스테이션은 다음과 같이 구성될 수가 있는데 가공이나 제품을 생산하기 위한 머시닝 센터와 머시닝 센터에 가공물을 제공하고 공구를 교환하는 로딩/언로딩 스테이션, 그 다음에 조립을 수행하는 스테이션 그리고 검사 스테이션 등이 포함되어 있다.

다음 그림 2-2에서와 같이 각 영역에는 동일한 작업을 하는 기계들이 모여 있다. 선반작업, 밀링작업, 드릴링 작업, 그라인딩, 그다음에 조립과 페인팅 작업으로 영역이 나누어져 있으며, 각 부품은 서로 다른 영역들을 필요에 따라 이동하면서 작업이 할당되어 있지 않은 기계를 선택해서 이를 수행하게 된다. 그림에서 보는 것 같이 이러한 셀 방식의 제조 시스템에서 자동화를 이룩하려면 기계 자체보다는 물류를 담당하는 이송 장치와 그리고 로딩/언로딩을 실행해 줄 수 있는 작업물 핸들링 시스템들이 필요하다. 따라서 여기에서 주로 사용되는 로봇들은 핸들링 시스템과 자율 주행 또는 AGV 로봇이라고 할 수 있다.

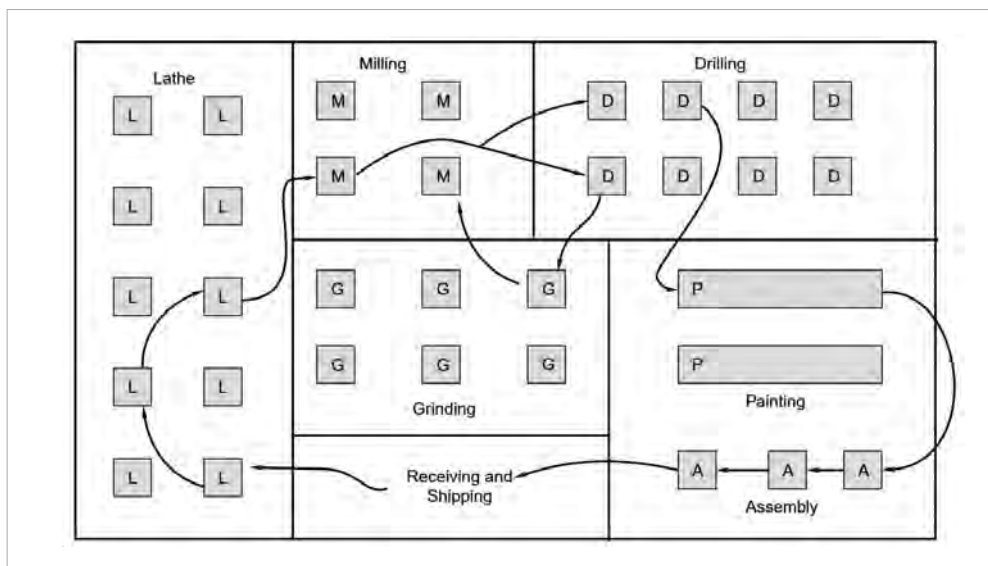


그림 2-2 제조 셀로 구성된 공장의 레이아웃 [2]



그림 2-3 AGV 기반의 FMS 시스템의 예 [3]

앞선 그림 2-3에서와 같이 공작기계 제품을 생산하는 베이스 로봇이 있고 제품을 지지하는 팔렛이 존재하며, 팔렛에서 필요한 부품들을 가져와서 반송 컨베이어 벨트에 전달하게 된다. 부품 공급 장치는 필요한 부품을 AGV를 통해서 제공받게 되며, 베이스 로봇은 생산된 결과물들을 발송 컨베이어에 전달함으로써 적절한 시간에 제품들이 저장소로 도착할 수 있도록 도와준다. 따라서 이러한 시스템들을 구성함으로써 생산하는 기계가 최대의 성능을 발휘할 수 있도록 도와주게 된다.

일을 보다 더 상위 개념에서 간판 시스템을 통해서 각 워크스테이션에 작업 상태와 작업에 따른 Bottleneck이 생기지 않도록 이송 장치와 머트리얼 핸들링 시스템들을 관리하는 기능들을 간판 시스템이라고 한다. 또한 이러한 동일한 제품들을 동일한 기계들이 사용하는 것들을 유추할 수 있기 때문에 이를 그룹핑함으로써 보다 더 효율적으로 라인을 움직일 수 있는 그림 2-4와 같은 Group technology를 적용할 수 있다.

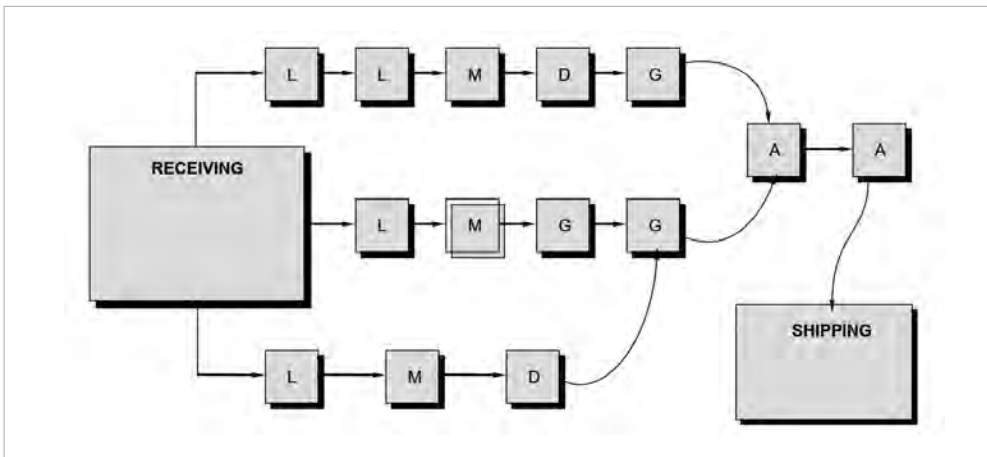


그림 2-4 Group technology를 적용한 공정 레이아웃 구성 예 [2]

4. Holonic Manufacturing System

앞서 설명한 FMS는 다품종 대량생산이 가능한 완벽한 기능의 제조 시스템이지만 설비투자가 많이 들고 시스템 변경의 어려움이 있다. 다품종 대량생산이 가능하나 완벽한 기능을

제공하는 FMS 시스템이지만, 각 설비의 단가가 굉장히 높기 때문에 전체적인 설비투자자가 많이 되는 방법이라고 할 수 있다.

좀 더 구체적으로 공작기계를 생각해보자. 하나의 설비가 여러 개의 기능을 하기 위해서는 여러 개의 공구와 대형 터렛을 부착하거나 또는 여러 개의 모터로 구성된 다관절 로봇을 이용할 수밖에 없다. 그리고 제품이 다양해지면 그만큼 기능도 많아져야 하기 때문에 장비 하나하나가 매우 비쌀 수밖에 없다. 따라서 이러한 장비를 모두 구축해야만 FMS의 기능을 할 수 있는데, 이를 위해서는 당연히 많은 설비 비용이 소요될 수밖에 없다. 또한 제품에 다양성이 높아질수록 이를 생산하기 위해서 더 많은 설비를 투자해야 하고, 이에 들어가는 프로그램 개발 비용까지 고려한다면, 시스템 운영이 굉장히 고가일 수밖에 없다. 거기에 더해서 제품 변경이나 아니면 시장의 요구에 맞추기 위해서 새로운 설비를 들여야 하는 경우에는 시스템 변경에 많은 프로그램을 업데이트해야 문제가 발생할 수 있다.

이러한 FMS의 한계를 극복하기 위한 방안으로서 HMS가 거론되었다. HMS는 Holon으로 구성되는데 Holon은 하나의 의사결정과 역할을 수행할 수 있는 독립된 개체를 의미하고, HMS는 이러한 Holon으로 구성되어 있는 하나의 시스템을 의미한다. Holon은 크게 두 가지 성격을 가지고 있는데 첫 번째로 자율성이 있다. 이 자율성은 Holon 자체가 스스로 전략을 가지고 일을 수행하고 제어할 수 있는 능력을 말하며 동시에 자신의 객체를 관리할 수 있고 생성할 수 있는 능력을 의미한다. 두 번째로는 Holonarchy라는 개념인데, 이 개념은 정확한 Holon 자체의 목적을 가지고 있고, 이 목적의 목적을 이루기 위해서 협력을 하거나 아니면 서로 연락을 하는 등을 말한다. 그림 2-5에서와 같이 Holon은 물리적인 프로세싱과 물리적인 제어 기능을 갖는 동시에, 물론 자체가 외부와 인터페이스할 수 있고 사람과도 인터페이스할 수 있는 정보 프로세싱 기능을 갖고 있으며 그 중심에는 자신의 목적을 달성하기 위한 의사결정을 탑재하고 있다.

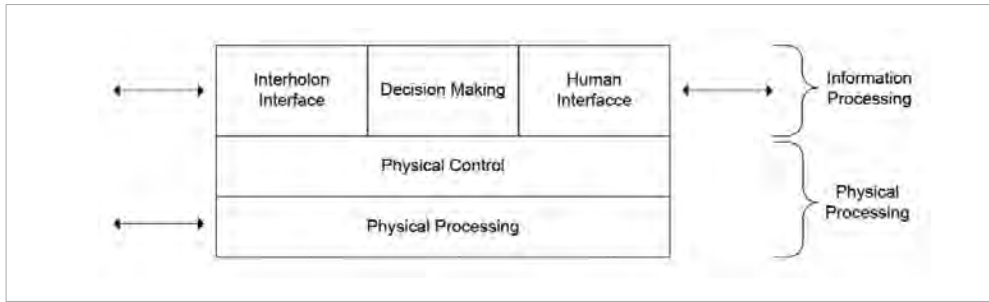


그림 2-5 일반적인 Holon의 구성요소 [4]

이렇게 구성된 Holon을 좀 더 구현 관점에서 살펴보면 그림 2-6과 같다. 가장 중심적인 것은 정보처리 기능인데, 이 정보처리 기능을 좀 더 구체적으로 살펴보면 협력 기능과 통신 기능, 조직을 관리하는 기능, 자신의 행동을 제어하는 네 가지 기능을 탑재하고 있다. 또한 의사결정에는 크게 두 가지를 수행하는데 첫 번째로는 자기 자신의 객체를 관리하기 위한 의사결정과 그다음으로 주변 Holon과 협력하기 위한 소셜 의사결정 기능을 가지고 있다.

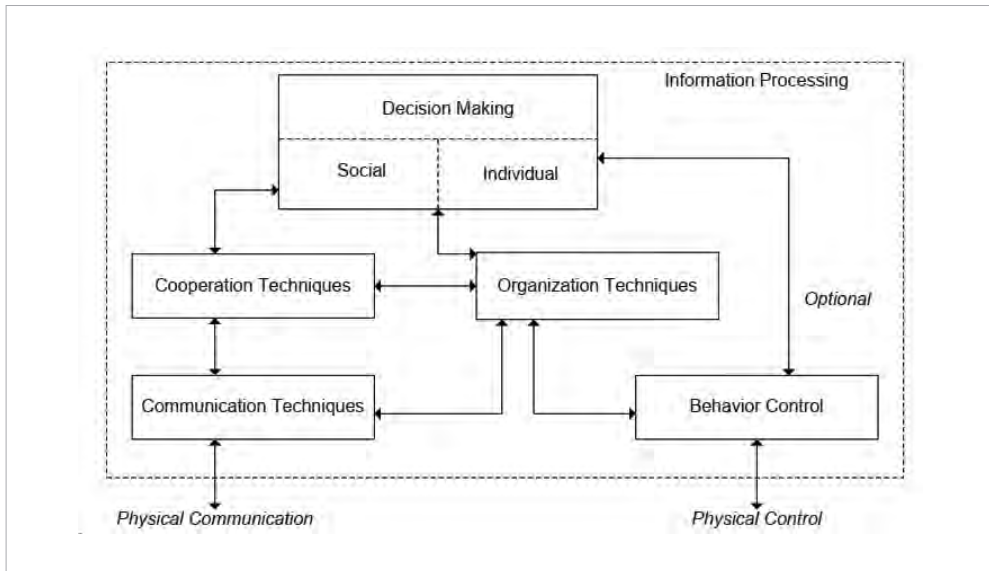


그림 2-6 Holon의 정보처리 기능의 세부 구성요소 [4]

이런 HMS를 실제 제조 환경에 적용하기 위한 아키텍처로 PROSA(Product-Resource-Order-Staff Architecture)가 있다. PROSA 안에는 주문 Holon 그리고 제품에 대한 Holon, 자

원에 대한 Holon으로 나누어서 그 특성들을 구축한다. 이 세 가지 성격이 다른 Holon 간의 역할 분담을 통해서 생산 시스템을 운용한다.

그림 2-7에서 보는 것 같이, 먼저 주문 Holon이 생성되면 자신의 실체가 될 수 있는 제품 Holon에게 제조 정보를 넘겨준다. 제품 Holon은 자신을 만들기 위해서 필요한 리소스들에게 필요한 정보들을 받아서 협상을 수행하여, 다른 제품 Holon과 경쟁을 통해서 원하는 자원을 차지하게 된다. 또한 주문 Holon은 자신이 생산되고 있던 결과물에 대해서 자원 Holon 으로부터 실제 수행된 결과들을 제공받게 된다.

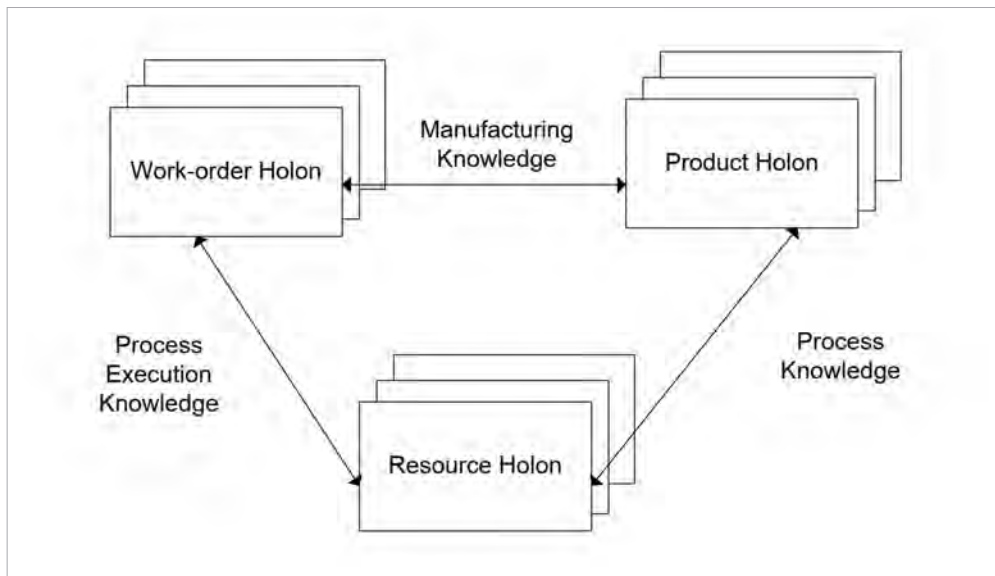


그림 2-7 PROSA 구조의 구성 Holon들의 관계 [4]

이러한 완전 자율형 HMS는 매우 우수한 개념이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 HMS를 구현하기 위해서는 너무나도 현실적인 여러 가지 기술적 문제들이 발생할 수 있는데, 이에 대한 정확한 해답은 아키텍처에서 제공해 주지 못하는 현실이다. 따라서 좀 더 현실적인 제조 시스템 개념이 필요하다.

5. Reconfigurable Manufacturing System

앞서 설명한 HMS는 개념적으로는 매우 우수하지만 이를 구체화하기 위한 정확한 방안을 제시해주지 못하고 있다. 따라서 좀 더 실질적인 개념으로 등장한 것이 RMS라고 할 수 있다. RMS는 재구성 가능한 제조 시스템을 의미하는데, 이는 주어진 조건이나 시장 변화 그리고 제품의 변경에 따라서 제조 시스템들을 빠르고 그리고 낮은 비용으로 변경할 수 있다는 의미이다. 따라서 다품종 소량생산이 요구되는 많은 부품을 가진 제품에 대해서 이러한 RMS가 적용되기 시작했다. 특히, 자동차 산업 전용 생산 시스템인 포드 시스템에서 좀 더 다양한 형상의 제품들과 용도에 따른 변경이 필요해지면서 이러한 RMS가 요구되었다. 그림 2-8에서 보는 것처럼 기본적인 바탕이 되는 바디에 대한 부품들이 있고, 이러한 바디에 도어나 아니면 프레임 또는 앞뒤 후드 부품 등이 사용자의 요구에 따라서 변경되기 시작하면서 자동차 산업의 다품종 대량생산이 필요하게 되었다.

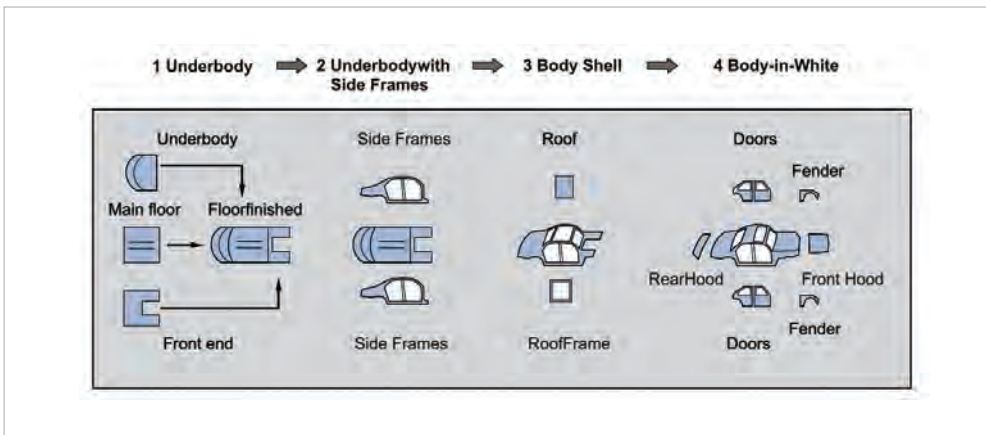


그림 2-8 자동차의 모듈형 부품들 [5]

이를 충분한 설비 투자에서 모두 감당하기 위해서는, FMS와 같이 완전 자동 시스템을 구축하기에는 무리가 있다. 따라서 이를 실현하기 위해 좀 더 개별적인 설비들의 대한 새로운 개념이 필요하게 되었다.

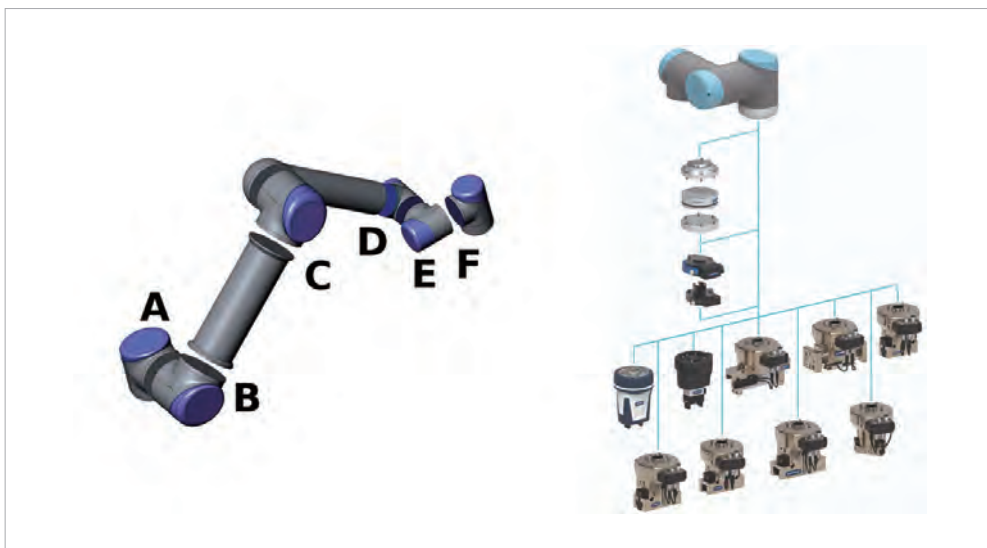


그림 2-9 모듈형 로봇의 예(좌) [6], 다양한 기능의 모듈들(우) [7]

RMS는 기본적으로 제조 시스템의 기능들을 빠르게 변경하기 위해서 머신이나 제어기 같은 구조를 쉽게 변경할 수 있는 설계를 지닌 시스템이라고 할 수 있다. 따라서 예를 들어 로봇 모듈을 생각했을 때, 각 로봇은 구동 조인트 모터와 지지대가 되는 블록들을 따로 분리해서 언제든지 원하는 형태의 로봇으로 그림 2-9와 같이 길이나 기능을 바꿀 수 있는 모듈 형태로 설계될 수 있다. 더 나아가 전체 여러 개의 공정으로 되어 있는 기능도 물류시스템과 인터페이스 그리고 내부 기능들을 여러 개로 조합해서 내가 원하는 작업이나 공정 설비를 만들어낼 수 있는 개념이다.

그림 2-10에서 보는 것 같이 공작기계로 예를 들면, 공작기계를 구성하는 축과 터렛, 스핀들 모터가 있는데, 이 세 가지 구성요소를 내가 필요에 따라서 제어기와 연결할 수 있는 기능을 생각해 볼 수 있다. 이 세 가지를 좀 더 단순하게 머시닝 유닛으로 생각해 볼 수 있는데, 각 머시닝 유닛은 공압과 AC 전력, 버스 시스템을 가지고 있어야 하는데, 이 세 가지를 동일하게 제공해줌으로써 표준화된 형태를 따르는 머시닝 유닛은 언제든지 부착하고 탈착할 수 있는 형태가 될 수 있다. 따라서 공작기계가 원래는 스핀들 모터 하나와 공구 터렛 하나를 가지고 있다 하더라도 언제든지 두 개의 모터와 두 개 터렛으로 확장 가능할 수 있다.

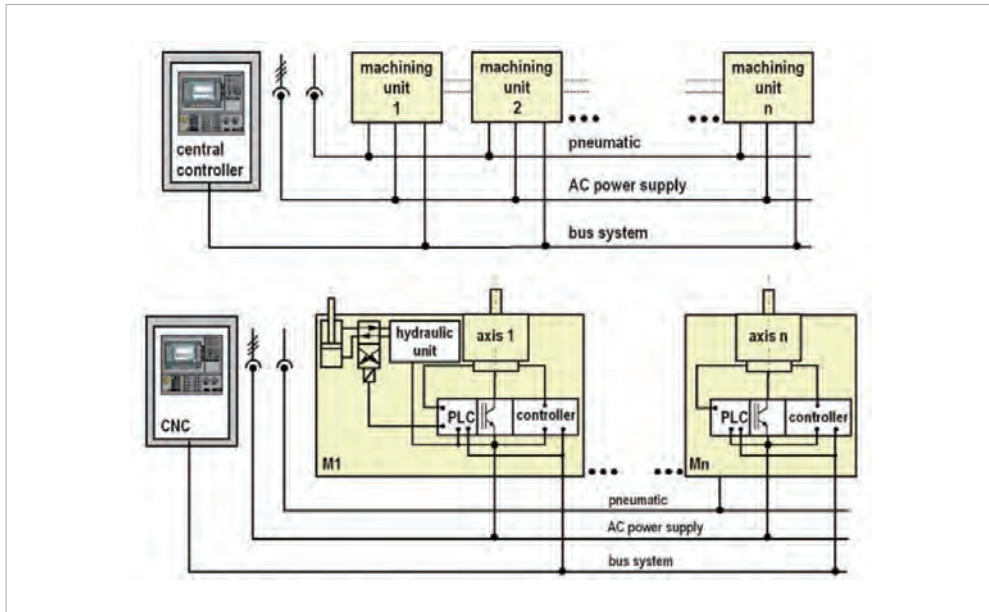


그림 2-10 공작기계의 모듈형 연결 구조: 공용 인터페이스(상), 실제 구조(하) [5]

RMS에서 더욱 발전한 개념으로서 Cognitive factory를 들 수 있다. Cognitive factory는 RMS에서 보여준 유연성과 생산성을 극대화한 형태라고 할 수 있다. 그림에서 보는 것과 같이 가장 생산성이 낮은 형태로 싱글 머신 시스템을 들 수 있다.

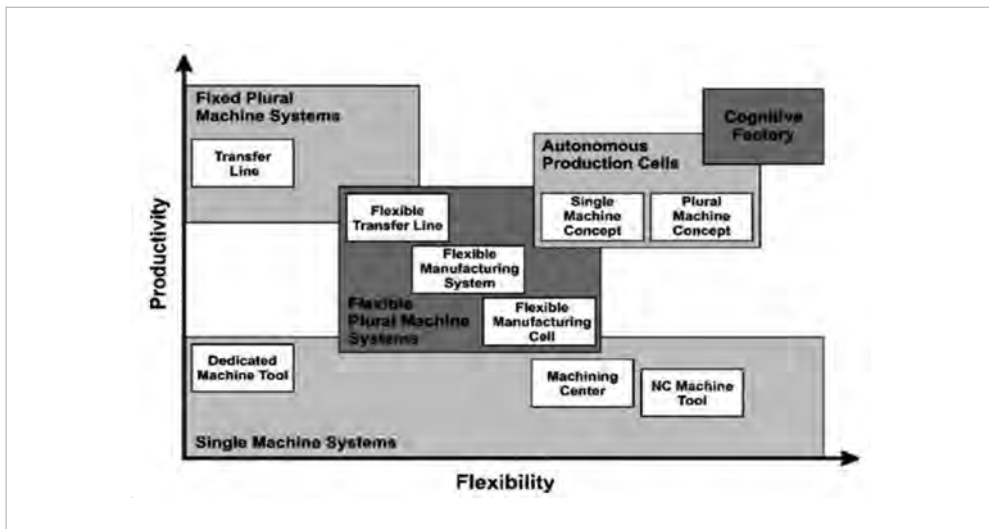


그림 2-11 제조 시스템의 형태에 따른 생산성과 유연성 비교 [5]

싱글 머신 시스템이 모든 유연성을 감당하기 위해서는 굉장히 넓은 범위를 커버해야 되는데, 이는 고가의 장비를 구매해야 한다는 의미이다. 이에 중간적인 형태로 FMS를 들 수 있는데, 이 FMS는 적절한 중간 단계에 속하게 된다. 이를 RMS와 같은 좀 더 자율적인 생산 셀로 구축할 수 있는데, 이를 통해서 훈련성과 생산성을 높일 수 있다. 각 제조 시스템의 관계도는 그림 2-11에 나타나있다.

하지만 이를 더 극복하기 위해서는 완벽한 개체들이 머신 자신들이 필요에 따라서 재구성할 수 있고 기능들을 보완하고 변경할 수 있는 기능까지도 탑재해야 한다. 이를 위해서는 다음 그림에서 보는 것과 같이 제조 환경에 있는 구성요소를 각 시스템이 스스로 알아내서 여기에 적절한 학습을 수행하고 이에 대한 논리적인 판단을 실행한 다음, 기존 지식을 바탕으로 새로운 계획을 세우거나 액추에이터를 제어할 새로운 액션들을 만들어낼 수 있어야 한다. 이렇게 하면 그림 2-12와 같이 앞서 이야기한 HMS와 RMS를 모두 결합한 완벽한 Cognitive factory가 실행될 수 있다.

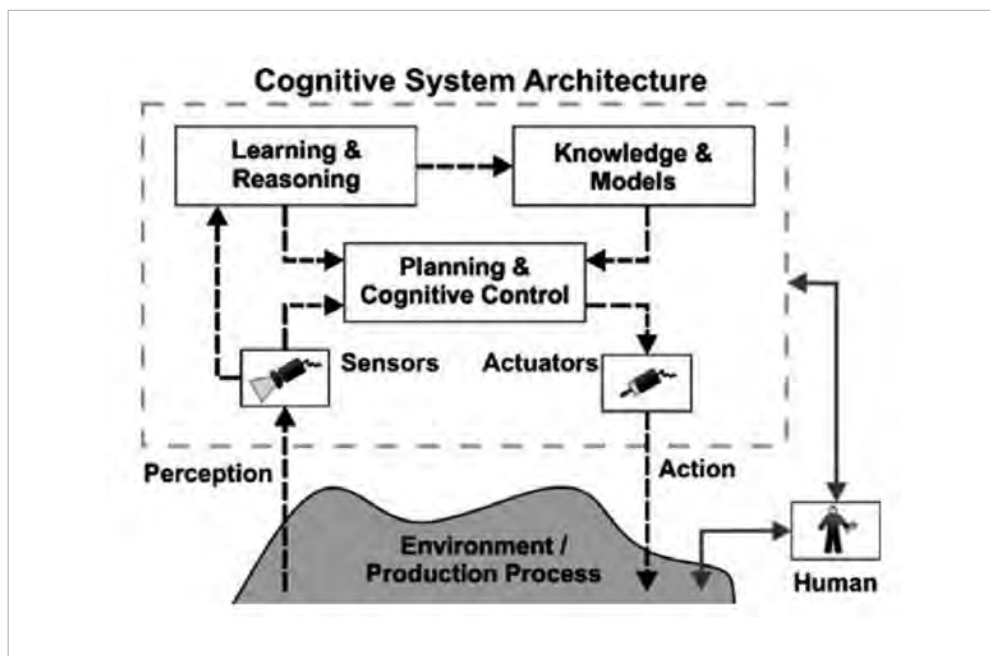


그림 2-12 Cognitive factory의 미래 발전 방향 [5]

6. 산업 인공지능

이번 절에서는 이러한 스마트팩토리 환경에서 인공지능을 어떻게 적용할 수 있는지 살펴 보도록 한다. 세계 최초 스마트팩토리 구현 모델인 SmartFactoryKL의 Industry 4.0 Plant 데 모공장은 여러 개 모듈의 그룹으로 구성된 셀로 만들어져 있으며, 각 그룹별로 자율 주행 로봇에 의해서 연동되어 있는 형태이다. 동시에 작업자와 원활한 그리고 자연스러운 연합을 위해서 증강 현실이나 아니면 5G와 같은 여러 가지 통신 수단들이 활용되고 있다. 특히 이러한 산업에 적용하는 인공지능에 대해서 두 가지 다른 관점이 있다. 첫 번째로는 사람의 능력을 에뮬레이션하기 위한 강력한 AI를 개발한 휴먼브레인 프로젝트가 있다. 다른 한편으로는 사람의 능력을 확장하고 증진시키기 위한 약한 AI를 지향하는 연구 그룹들도 있다. 특히 독일 인공지능연구소 같은 경우는 이러한 인공지능을 응용해서 인간 능력을 확장시키는 데 초점을 두고 있다.

그러면 이러한 응용 AI를 어떻게 제조산업에 적용할 수 있을까? 쉽게 생각했을 때 스마트팩토리를 구성하는 여러 가지 모듈 중에 하나로서 사람을 생각해 볼 수 있다. Administration Asset Shell의 하나로 사람을 바라볼 수 있는데, 이럴 경우 기존 사람이 가지고 있던 여러 가지 장비들을 지능화시켜야 하는 문제가 있다. 예를 들어 작업용 헬멧 안에 증강 현실 컴퓨팅과 카메라를 설치하여 물체를 인식해서 정보를 제공해 준다거나, 작업자의 언어를 인식해서 반응하는 음성 서비스, 또는 로컬 데이터베이스를 통해서 즉각적인 프로세스 정보를 제공해주는 기능들을 생각해 볼 수 있다. 조작에 어려움이 있는 무거운 물체를 다룰 수 있는 적응형 그리퍼나 ExoSkeleton 등이 활용될 수 있다.

그러나 이러한 시스템들을 연결한다 하더라도 사람이 사용하는 언어나 글과 같은 여러 가지 표현 방법을 디지털화하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 사람이 사용하는 심볼릭한 형태로 변경하기 위해서는 데이터 기반의 인공지능과 함께 Symbolic AI가 활용돼야 할 필요가 있다. 이렇게 인간의 지식을 활용하는 몇 가지 도전과제들이 있다. 구체적으로 사람이 가지고 있는 지식을 인공지능에게 알려 주는 것과 반대로 인공지능이 판단한 결과를 사람에게 빠르고 정확하게 이해시키는 것을 들 수 있다. 제조 환경에서 대표적으로 나타날 수 있는 사례들로는, 1) 조립용 산업 로봇의 고장진단을 예측한다거나, 정지가 필요한 고장이 언제 발

생할 것인지를 추산하는 기능들이 있다. 또는 2) 대형 공정 라인을 최적화시키기 위해서 수학적 스케줄링과 함께 데이터에 기반한 정확한 학습 모델도 고려해 볼 수 있다. 3) 마지막 사례로는 조립 작업 셀에서 작업 전문가가 하는 방법들을 디지털화하거나 아니면 기존에 저장되어 있던 조립 방법을 초보자에게 알려주는, 즉 지식을 전달하는 스마트 조립 작업대를 들 수 있다. 이 세 가지 사례로 미루어 봤을 때 스마트팩토리상에서 우리가 적용해 볼만한 산업 인공지능 사례들을 살펴볼 수 있다.

다음으로는 앞선 응용을 위한 인공지능 사례와 이를 로봇 산업에 적용하기 위한 대표적인 접근방법을 제시하도록 한다. Bin picking과 가상현실의 사용은 앞서 언급한 인공지능 활용을 극복하기 위한 주요한 인공지능 적용 방안이라고 할 수 있다.

7. Bin Picking

Bin Picking은 협동 로봇 사례로 가장 손꼽히는 부분 중의 하나이다. 특히 산업용 로봇이 활용되는 부분 중에 최근 들어서 머신 텐딩과 같이 작업자의 반복 작업을 위해서 수행하는 기능들이 있다. 빈 피킹에서는 물체를 인식하고 주어진 물체의 방향에 따라 미리 정해져 있는 프로그램을 수행하여 로봇이 정확한 위치를 찾는 데에 중요한 부분들이 있다. 이런 위치를 찾기 위해서 여러 가지 접근 방법들이 사용되는데 기존에는 OLP(Off-line programming) 위에서 사전에 만들어진 프로그램을 구동하거나 티칭 펜던트를 이용해서 작업자가 눈으로 보면서 프로그래밍하는 경우들이 많았다.

하지만 다품종 소량생산의 물건들이 많아지면서 이러한 수요에 일일이 맞춰서 티칭 펜던트 이용해서 프로그래밍하는 것은 생산성이 낮다. 왜냐하면, 모델이 바뀌거나 제품이 달라지면 피킹 포지션이 달라질 수밖에 없고, 이에 대한 반복 작업을 수행하면서 정확한 위치를 잡는 시간에 차라리 사람이 작업하는 것이 훨씬 낫기 때문이다. 기존의 방법들은 2D 카메라를 이용해서 미리 사전 학습된 이미지를 이용하여 정해진 물체의 위치와 방향을 판단하는 방법이다. 이를 위해서는 해당 물체를 여러 번 이미지로 촬영해야 하는 수작업이 필요하다. 그리고 위치와 방향이 잡히게 되면, 이를 이미 프로그래밍되어 있는 컨트롤러에 도착 위치

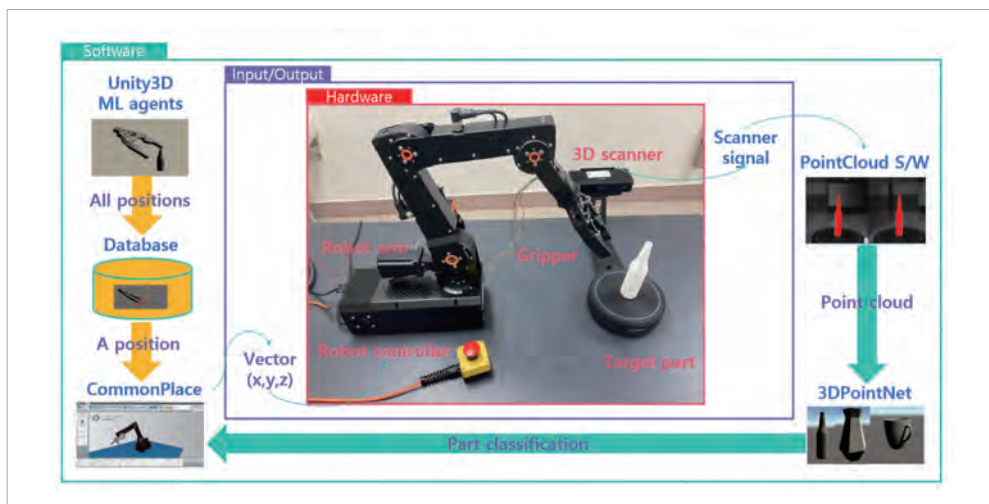


그림 2-14 GadgetArm의 학습, 인식작동 구조도 [9]

8. 가상현실

인더스트리 4.0의 사이버-물리 시스템은 동기화된 디지털을 구현하는 데 목적이 있다. 이러한 디지털 트윈은 실제로는 사이버공간을 의미하게 되고, 이 역시 가상현실로 구현되게 되어 있다. 이렇게 구현된 대표적인 로봇 프로그램용 가상현실은 오프라인 프로그램이라고 할 수 있다. 이런 오프라인 프로그램에도 가상현실을 포함하고 있는데, 이 가상현실 안에서는 로봇을 어떠한 위험도 없이 자유로이 실행할 수 있다. 따라서 이러한 가상현실은 로봇에게 높은 자동화를 위해 필요한 연습 공간들을 제공해 줄 수 있다. 이제부터 공장에서 가상현실을 로봇에 활용할 수 있는 네 가지 측면들을 살펴본다.

일반적으로 가상현실이 로봇에 많이 사용되는 분야가 바로 충돌 감지다. 가상현실은 물리 엔진을 이용하여 로봇의 예상 경로를 찾아낼 수 있으며, 그 경로 안에 위치한 사물들을 확인하여 미리 충돌 가능성을 판단할 수 있다. 로봇 예상 경로는 OLP에서 이미 계산되어 있기 때문에 주요 설비들을 3D 모델로 위치시키기만 하면 이것이 가능하다. 이렇게 가능한 모든 형상을 동일한 가상현실 서버로 업로드하게 되면 사전에 충돌들을 미리 확인할 수 있다. 또한 물리 엔진을 이용해서 간단한 스크립트 언어로 조작한 다음, 외부 시스템과 쉽게 통합할

수 있기 때문에 로봇 제어 시스템에 바로 적용할 수 있다. 이와 같이 간단한 스크립트 언어로도 다양한 물리 엔진을 구축할 수 있기 때문에 충돌 감지에 매우 유용하다고 할 수 있다.

다음으로 동기화된 가상현실을 이용한 실시간 로봇 제어가 가능하다. 공장 구조물 CAD 정보와 로봇의 기구학 정보를 바탕으로 만들어진 가상현실은 실시간으로 로봇과 연동할 수 있는 좋은 도구가 될 수 있다. 앞서 설명한 OLP는 이미 로봇 제어기와 가상현실이 동기화된 좋은 예라고 할 수 있다. 이와 마찬가지로 공장 전체의 디지털 트윈과 함께 구축되면 보다 전체 최적화 시뮬레이션이 가능한 제어 시스템이 될 수 있다. 특히 실시간으로 공정을 최적화시킬 수 있을 뿐만 아니라 가상 환경 중심으로 원격으로 제어도 가능하다고 할 수 있다. 이 가상 환경은 앞서 설명한 충돌 감지는 물론 공정 최적화도 가능하기 때문에 그 활용도가 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 가상 환경이 로봇 제어에 많은 자유도를 제공해 줄 수 있는 도구가 될 수 있다.

이렇게 실시간으로 가상공간을 이용하는 것뿐만 아니라 여러 가지 상상력을 로봇에게 제공해 줄 수 있는 툴이 될 수도 있다. 그중에 대표적인 사례가 강화학습 연습 공간으로 사용할 수 있다는 것이다. 인공지능과 결합된 강화학습은 무엇보다 비지도학습으로 학습 데이터를 생성할 수 있는 환경이 필요하다. 그림 2-14는 3D 비전과 강화학습을 활용한 로봇 제어의 예시를 설명한 구조도이다. 강화학습은 주어진 환경에서 딥러닝 모델을 통해서 학습해 나가는 방법이기 때문이다. 이는 환경이 주어지기만 하면 환경을 인지하고 보상을 줄 수 있는 함수를 따라서 인공지능이 데이터셋을 구축해 나간다. 그래서 원하는 목표를 달성할 때까지 반복할 수가 있다. 동시에 비지도학습은 학습 데이터셋 없이 높은 지능적 수준에 도달할 수 있기 때문에 매우 유용하다. 그래서 이러한 가상공간은 로봇의 자동화를 높여주며 자율적 제어를 증가시켜 주기 때문에 매우 유용하다고 할 수 있다. 그림 2-15는 그리퍼의 위치 선정을 찾는 강화학습 모델의 예를 보여주고 있다.

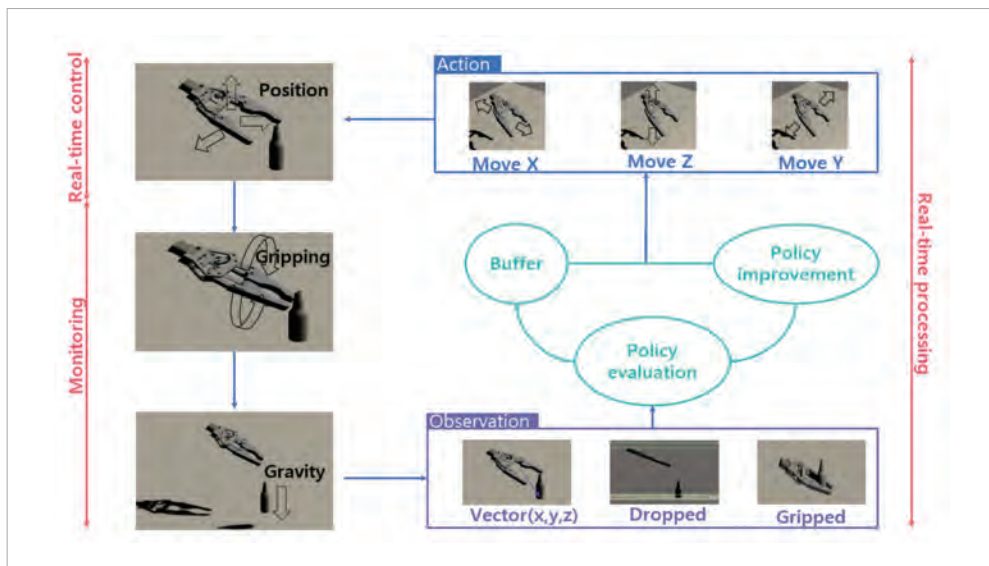


그림 2-15 그리퍼와 물체의 강화학습 모델 [9]

마지막 사례는 bin picking을 위해 사용되는 비전 알고리즘 데이터셋 구축 방안에 사용될 수 있다는 것이다. bin picking에서는 물체 이미지를 통해서 위치와 방향을 파악하게 된다. 이는 bin picking에 있어서 물체를 정확히 파악하는 게 중요하기 때문이다. bin picking 그리고 파악된 위치 정보를 바탕으로 미리 지정되어 있는 그리핑 위치를 찾아가게 된다. 위치가 정확하지 않으면 그리핑에 실패할 수밖에 없다. 그리핑에 있어서 필요한 이미지 데이터셋은 bin picking 자동화에 있어서 필수이다. 그래서 이러한 이미지 데이터셋을 구축하기 위해서는 여러 사진들을 한 제품에 대해서 촬영해야 한다.

하지만 가상현실 측면에서는 렌더링 기술이 매우 발달하고 있어 실제 조명과 색감을 그대로 살려낼 수 있다. 다시 말해 캐드 형상만 가지고 있으면 가상현실 안에서 실제 사진과 동일한 이미지를 생성해 낼 수가 있다. 특히 가상현실은 따로 레이블링이 필요 없기 때문에 바로 데이터셋에 레이블링이 자동으로 이루어지게 된다. 이를 이용해서 학습 데이터셋을 구축하게 되면 촬영을 하기 위한 수작업이 필요 없게 된다. 새로운 사물이 들어오더라도 이미지 데이터셋을 자동으로 만들어 빈 피킹을 사람의 도움 없이 수행할 수 있게 된다.

앞선 사례를 통해서 가상현실로 구현된 디지털 트윈은 로봇의 학습공간으로 사용할 수 있다는 것을 확인하였다. 각 사례의 네 가지 활용 시나리오는 가상현실을 로봇 분야에 활용할

수 있는 대표적인 사례라고 할 수 있다. 이러한 네 가지 대표적인 활용 방안을 통해서 로봇 시스템에 자율성을 높이게 되고 자동화율도 동시에 높일 수 있다. 이 중에 충돌 감지 강화학습 이미지 데이터셋은 실제로 움직이기 이전에 수행하는 작업들이다. 다시 말해 로봇이 실제 움직이기 전에 상상으로 학습할 수 있는 공간이라고 할 수 있다. 다시 말해 이는 마치 사람이 어떤 동작을 하기 전에 이미지 트레이닝을 하듯이 로봇도 이미지 트레이닝이 가능하다고 할 수 있다. 이런 접근 방법은 원샷 러닝과 같은 현실에 시행착오 없이 바로 시각적으로 새로운 환경에 적응해서 동작을 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

참고문헌

- [1] BEAM, Industrial Robots Are Changing Manufacturing, <https://beamberlin.com/industrial-robots-are-changing-manufacturing>, Access in 2021.09.02.
- [2] Shivanand, H. K. (2006). Flexible manufacturing system. New Age International.
- [3] MiSUMi, Warehouse Automation Part2: Automatic Guided Vehicle & Autonomous Mobile Robots, <https://us.misumi-ec.com/blog/warehouse-automation-part-2-automatic-guided-vehicles-autonomous-mobile-robots>, Access in 2021.09.02.
- [4] Botti, Vicent, Giret Boggino, Adriana. (2008) ANEMONA A Multi-agent Methodology for Holonic Manufacturing Systems, Springer
- [5] ElMaraghy, H. A. (Ed.). (2008). Changeable and reconfigurable manufacturing systems. Springer Science & Business Media.
- [6] Universal robots. (2018) Universal Robots e-Series 사용자설명서, Universal robots, UR5e/CB3 버전 5.0.0.
- [7] SCHUNK, Universal Robots 로봇 암을 위한 완전한 모듈식 그리핑 시스템, https://schunk.com/kr_ko/nyuseu/hailaitau/gongji/article/3938-universal-robots-lobos-am-eul-wihan-wanjeonhan-modyulsig-geuliping-siseutem, Access in 2021.09.02.
- [8] Mousavian, A., Eppner, C., & Fox, D. (2019). 6-dof graspnet: Variational grasp generation for object manipulation. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 2901-2910).
- [9] Park, J., Lee, S., Lee, J., & Um, J. (2020). GadgetArm—Automatic Grasp Generation and Manipulation of 4-DOF Robot Arm for Arbitrary Objects Through Reinforcement Learning. Sensors, 20(21), 6183.

3

인공지능과 기계학습



빅데이터 기반 지능화를 통한 생산 방식의 혁신인 4차 산업혁명(4th industrial revolution, 4IR)의 시대가 도래함에 따라 혁신적 제품과 서비스 제공 및 효율적인 생산체계 구축 등을 통해 인간 삶의 질이 향상되고 있다. 이러한 4차 산업혁명의 핵심적인 다양한 미래 기술 중의 하나인 인공지능(artificial intelligence, AI) 기술은 2015년 인간과 인공지능 바둑 프로그램인 알파고(AlphaGo)와 대국을 통해 새롭게 조명되기 시작하였으며, 그 이후 사회 전반의 다양한 분야에서 그 활용범위가 급속도로 확대되고 있다.

인공지능 기술은 인간의 사고방식을 모사하여 좀 더 빠르고 효율적으로 인간의 의사결정에 도움을 주고 있으나, 일정한 수준 이상의 지능을 가지기 위해서는 지속적인 학습을 요구한다. 이에 인공지능을 갖춘 기계가 효과적으로 학습하기 위한 방법이 바로 기계학습(machine learning, ML)이다. 과거에는 다양한 경험을 포함한 수많은 정보가 요구되고 이와 함께 빠른 학습에 필요한 컴퓨터 성능이 한계를 가지고 있어 기계학습의 적용이 어려웠으나, 현재 사물인터넷(internet of things, IoT) 기반 센서들로부터 빅데이터 획득과 GPU 기반 연산 속도 향상을 통해 다양한 딥러닝(deep learning, DL) 기반 알고리즘 기술들이 개발되고 있다. 그러므로, 이번 장에서는 인공지능의 기본적인 구성요소와 이를 구체적으로 구현한 다양한 인공지능경망의 구조 및 인공지능 작업들에 대해 살펴보고, 기계학습을 이해하기 위한 기초적인 지식들과 함께 기계학습 방법에 대해 간단히 학습하고자 한다.

1. 인공지능

인공지능이란 인간의 학습능력, 추론능력 및 지각능력을 모사할 수 있도록 인공적으로 컴퓨터 프로그램의 형식으로 구성된 시스템 기술을 의미한다. 이러한 인공지능은 “학습”(learning)을 통한 “문제 해결”(problem solving)을 목적으로 하고 있으므로, 현재 단지 인간의 지능을 흉내 내고 있는 컴퓨터 프로그램의 형태로 규칙이나 논리에 기반을 둔 논리적 추론만 가능할 뿐 철학적인 추론은 현실적으로 가능하지 않다.

1940년대 프로그램 가능한 디지털 컴퓨터가 개발됨으로써 인공지능 등장의 기반이 되었으며, 1956년 여름 미국 Dartmouth 대학에서 개최된 “Dartmouth Workshop”에서 처음으로 인공지능이라는 용어가 사용되기 시작하였다. 이후, 1970년대 초반까지 금전적 지원을 통해 검색을 통한 추론(reasoning as search), 자연어 분석(natural language analysis) 등과 같이 인공지능이 활용될 수 있는 다양한 분야에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 하지만 1970년대 중반부터 문제 해결에 필요한 엄청난 수의 조합으로부터 해법을 찾으려면 당시 컴퓨터 능력의 한계에 따른 문제가 대두되어 연구비 지원이 중단되는 상황에 처하게 되었다. 이후, 1980년 초반 특정 분야의 전문가 지식을 컴퓨터가 인지할 수 있는 표현 형태로 정보화함으로써 특정 문제에 대해 컴퓨터가 스스로 이 정보를 활용하여 논리적으로 해결책을 제시할 수 있는 전문가 시스템(expert system)의 개념이 도입되어, 다시 한번 인공지능 기술이 도약할 수 있는 기회를 가졌으나 1980년대 중후반 이후 인공지능 기술을 현실 문제에 바로 적용할 수 없다는 인식으로 인해 2010년대 초반까지 또다시 인공지능 기술 개발의 암흑기를 보내게 되었다.

이러한 상황에서 2010년대 초반부터 IoT 기술 등을 활용한 다양한 분야의 빅데이터 축적과 GPU 기반의 연산 속도의 획기적인 향상을 통해 기존 인공지능에 딥러닝 기술을 결합함으로써 현재까지 인공지능 기술의 황금기를 또다시 맞이하고 있다.

그러므로 본 절에서는 현재 사용되고 있는 인공지능망의 기본적인 구조와 함께 이를 활용한 다양한 인공지능 작업에 대해 학습하면서 이를 기본으로 하는 다양한 인공지능망의 구조에 대해 알아본다.

1.1 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)

최초의 인공신경망은 생물학적 신경망(biological neural network)으로부터 영감을 얻어 개발되었다. 이에 신경망을 구성하는 신경세포(nerve cell) 또는 신경원(뉴런, neuron)에 대해 먼저 살펴본다. 그림 3-1은 생물학적 신경세포 구조를 보여 준다.

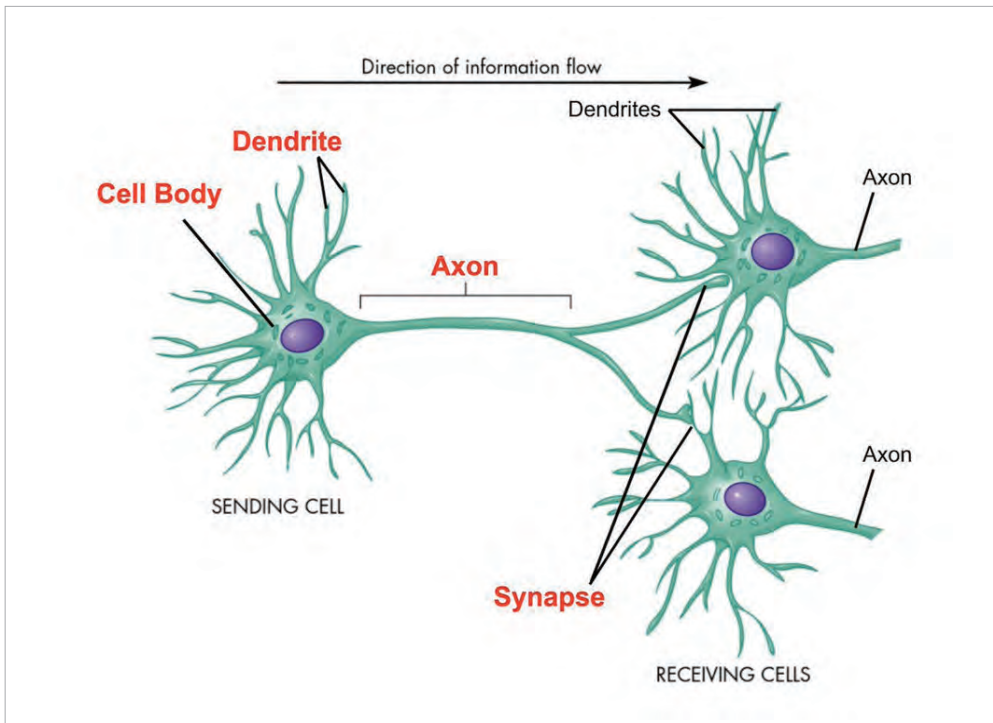


그림 3-1 Neuron (Nerve Cell) Anatomy

(<https://www.yumpu.com/en/document/read/33756198/axon-dendrite-cell-body-neuron-nerve-cell-anatomy-synapse>)

인간의 뇌를 구성하는 약 1,000억 개의 생물학적 신경세포는 크게 세포체(cell body), 여러 개의 수상돌기(dendrite), 1개의 축삭돌기(axon)로 구성되어 있다. 이 신경세포는 다른 신경세포로부터 수상돌기를 통해 신경전달물질을 받아 이를 세포체에 저장하였다가 일정한 수준 이상이 되면 축삭돌기를 통해 신경전달물질을 축삭종말부(axon terminal)에서 다른 세포로 전달하게 된다. 이때, 축삭종말부와 다른 세포의 접합부를 연결(시냅스, synapse)이라고 부르며, 다른 세포의 접합부는 세포체, 수상돌기, 또는 축삭돌기가 될 수 있다. 이와 같이 여러 신

경세포들이 서로 연결을 통해 연결되어 생물학적 신경망을 구성하게 된다.

이러한 생물학적 신경세포를 입력과 출력의 관점에서 나누어 본 것이 그림 3-2에 나타나 있다.

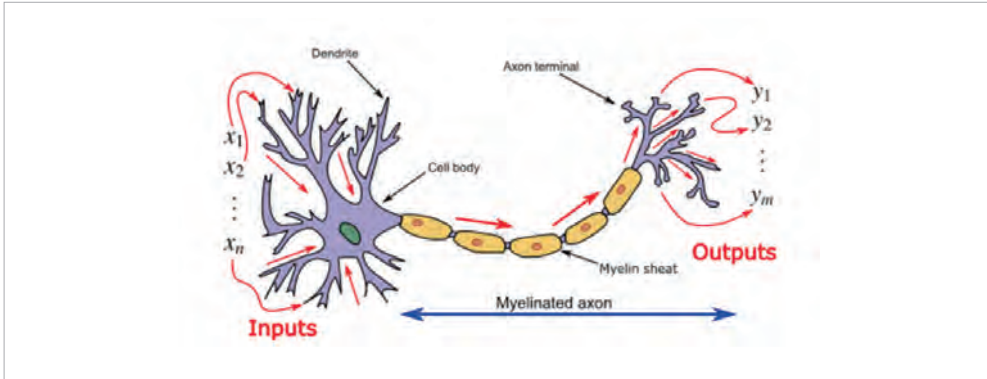


그림 3-2 Neuron Model (https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_neuron_model)

왼쪽에 존재하는 수상돌기로부터 입력되는 신경전달물질 유입을 “Inputs”, 그리고 축삭돌기 말단부로부터 출력되는 신경전달물질의 유출을 “Outputs”로 놓으면 수상돌기, 세포체, 및 축삭돌기 전체를 인공신경망을 구성하는 기본단위가 되는 마디 또는 노드(node)로 놓을 수 있으며, 이 노드를 통해 신경전달물질은 바로 신호의 형태로 노드의 입력과 출력으로 나타낼 수 있다. 이 노드들을 이용하여 생물학적 신경망을 모사한 인공신경망은 그림 3-3과 같이

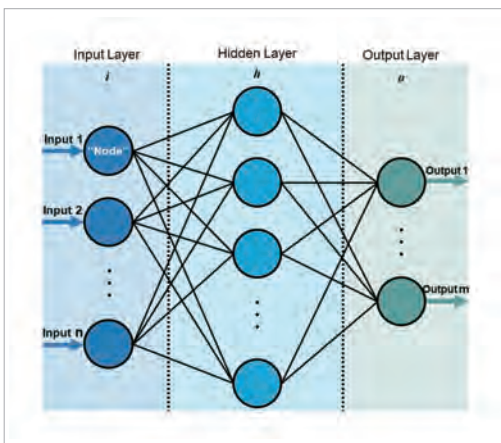


그림 3-3 Artificial Neural Network Architecture

구성되어 있다.

그림에서 보는 바와 같이, 입력 신호는 노드로 들어가는 방향으로 표시하고 출력 신호는 노드에서 나오는 방향으로 표시한다. 또한, 최초로 신호를 받아들이는 노드들을 입력 노드(input node), 마지막으로 신호를 내보내는 노드들을 출력 노드(output node)라고 명시하며, 이 입력 노드들과 출력 노드들이 각각

1개의 층(layer)을 구성하는데 이를 각각 입력층(input layer)과 출력층(output layer)이라 부른다. 이러한 입력층과 출력층 사이에는 은닉층(hidden layer)이라고 불리는 층이 존재하며, 이 층은 입력 신호로부터 출력 신호로 변환되면서 거쳐 가는 은닉 노드(hidden node)들로 구성된다.

그림 3-3에는 1개의 은닉층이 존재하지만 신호들이 여러 단계를 거쳐 지나갈 수 있도록 다수의 은닉층들이 배치될 수 있으며, 다수의 은닉층들이 존재하면 깊이가 깊어지고 이러한 구조를 통해 학습하는 과정을 딥러닝이라고 부른다. 그림 3-3에서 보듯이 일반적으로 전 단계 층(왼쪽 층)에 존재하는 모든 노드로부터 현 단계층(오른쪽 층) 각각의 노드들로 모두 연결되어 있다. 또한, 입력 신호의 수와 출력 신호의 수에 따라 입력층과 출력층이 가지는 노드 수는 결정되나, 실제 생물학적 신경망에서는 무수히 많은 뉴런들이 서로 연결되어 있기 때문에 은닉층이 가지는 노드의 수는 제한이 없다.

다음 소절에서는 지금까지 소개한 인공신경망을 기반으로 다양한 형태로 변형된 인공신경망에 대해 살펴보고 이의 구성 방법과 요소들에 대해 학습한다.

1.2 다층 퍼셉트론(Multilayer Perceptron, MLP)

앞선 소절에서 소개한 인공지능망과 동일한 구조에 대해 수학적 모델을 최초로 구축한 것이 바로 다층 퍼셉트론(multilayer perceptron, MLP)이다. 다층 퍼셉트론은 1958년 Frank Rosenblatt에 의해 제안된 그림 3-4의 퍼셉트론 개념으로부터 발전하게 되었다.

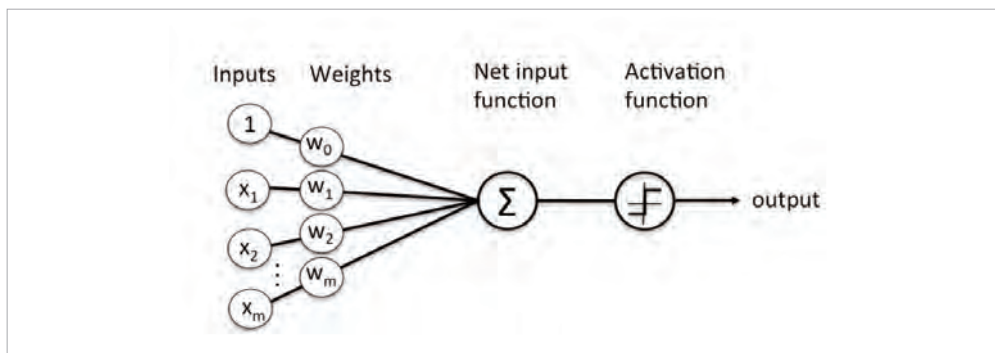


그림 3-4 Schematic of Rosenblatt's Perceptron

(https://sebastianraschka.com/Articles/2015_singlelayer_neurons.html)

m개의 입력 노드와 1개의 출력 노드만 존재하는 인공신경망에서 입력 신호의 전달은 단순히 화살표로 표현되는 것이 아니라 각각의 입력 신호에 가중치(weight)가 곱해져 다음 노드에 전달된다. m개의 가중치가 곱해진 입력 신호들을 모두 합하는 함수인 순입력함수(net input function)를 거쳐 최종적으로 선형 또는 비선형 활성화함수(activation function)의 출력값이 출력 신호로 결정된다.

이러한 퍼셉트론 개념은 1개의 신경세포에 대해 수학적 모델로 구현한 것으로 초기에는 매우 각광을 받았으나, 1969년 Marvin Minsky와 Seymour Papert가 제시한 XOR 분류 문제에 대한 퍼셉트론의 한계 문제로 이후 사용이 제한적이었다. 그러다가 1986년 James L. McClelland et al.에 의해 입력층과 출력층 사이에 은닉층을 삽입하면 비선형적 분류가 가능하다는 것을 보여줌으로써 다층 퍼셉트론 개념이 인공신경망의 수학적 모델에 적용되기 시작하였다.

다층 퍼셉트론은 인공신경망 구조에서 입력 신호에서 출력 신호로 전달되는 방향인 피드포워드(feedforward) 방식으로 신호 전달을 구성한다. 그림 3-5는 이 다층 퍼셉트론 구조를 보여준다.

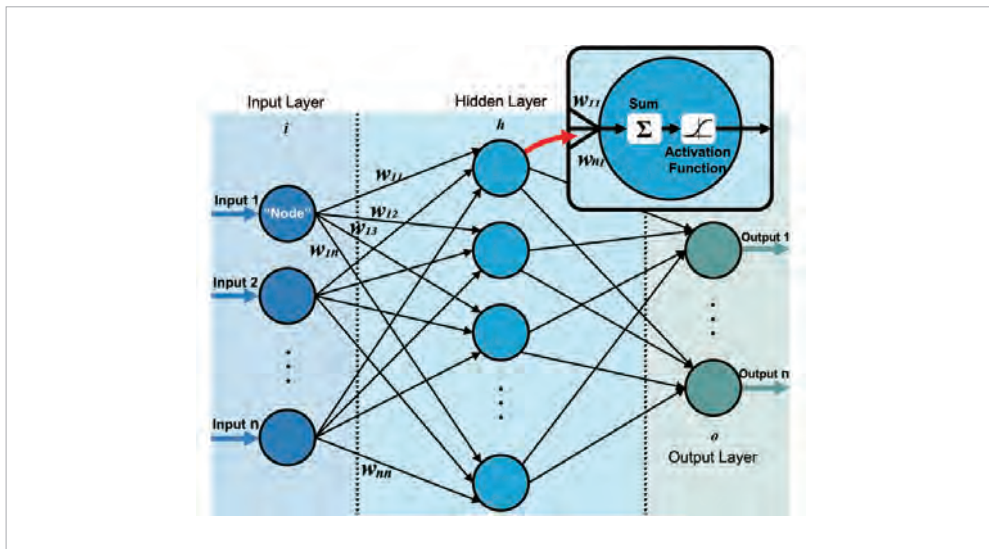


그림 3-5 Multilayer Perceptron Architecture

다층 퍼셉트론 구조에서 입력 노드를 제외한 은닉 노드들과 출력 노드들은 순입력함수와 활성화함수로 구성되어 있다. 일반적으로 순입력함수의 출력은 가중치가 곱해진 입력들의 순합(net sum)과 편향(bias)의 합으로 구성된다. 이러한 순입력함수의 출력은 다시 활성화함수의 입력이 되어 활성화함수의 출력은 다음 층의 입력이 된다. 일반적으로 이러한 활성화함수로는 그림 3-6에 나타난 것 같은 다양한 비선형 함수들이 사용된다.

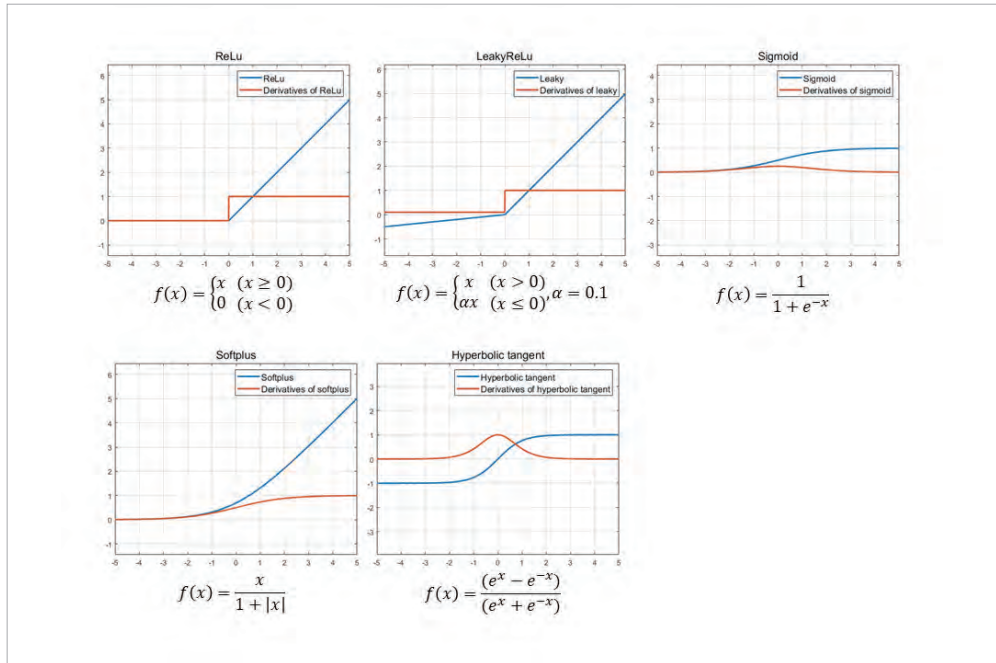


그림 3-6 List of Activation Functions

대표적인 활성화함수로 입력이 0보다 작으면 출력이 0이 되는 ReLU(Rectified Linear Unit) 함수, ReLU 함수의 변형으로 입력이 0보다 작으면 약간의 기울기를 가지는 값을 출력하는 Leaky ReLU 함수, 입력이 0 근처에서는 선형적이고 입력이 $-\infty$ 에 가까워질 때 출력이 0에 가까워지고 입력이 $+\infty$ 에 가까워질 때 출력이 1에 가까워지는 Sigmoid 함수, 입력이 $-\infty$ 에 가까워질 때 출력이 0에 가까워지고, 입력이 $+\infty$ 에 가까워질 때 출력이 기울기가 1인 직선에 해당되는 값에 가까워지는 Softplus 함수, 그리고 입력이 $\pm\infty$ 에 가까워질 때 출력이 ± 1 에 해당되는 값에 가까워지는 Sigmoid 함수와 유사한 Hyperbolic tangent 함수를 사용한다.

다층 퍼셉트론은 정해진 입력 정보와 출력 정보가 쌍으로 구성된 데이터에 잘 적용될 수 있는 인공지능 구조를 가지는 반면, 2차원 이상의 정보를 제공하는 입력 영상 내의 형상 특징(feature)을 통해 분류(classification)하기 위해서는 학습 시간(training time), 망 크기(network size) 및 가중치 수(number of weights)가 기하급수적으로 증가한다는 단점을 가지고 있다.

1.3 합성곱 신경망(Convolutional Neural Network, CNN)

앞의 소절에서 소개하였던 다층 퍼셉트론이 가진 문제점을 해결하기 위해 1989년 Yan LeCun에 의해 처음으로 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN)이 제안되었으며, 이러한 CNN의 구조는 그림 3-7에 나타나 있다.

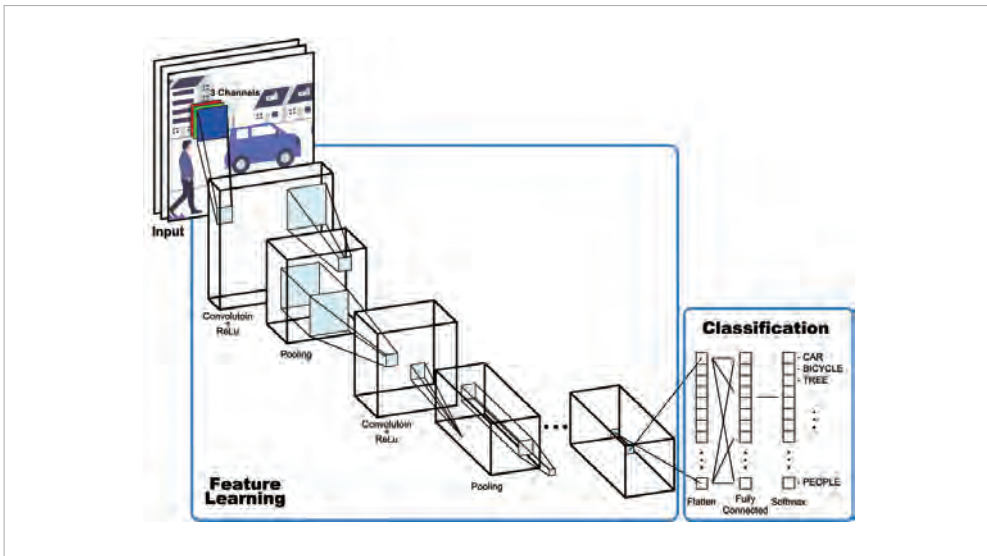


그림 3-7 Convolutional Neural Network (CNN) Architecture

CNN은 영상 내 형상의 특징을 추출하는 특징학습(feature learning) 부분과 분류(classification) 부분으로 크게 나누어진다. 특징학습은 커널(kernel)이라고 불리는 2차원 이상의 행렬(matrix)과 입력 영상으로 합성곱 연산을 수행하고, 그 결과를 다시 활성화함수 ReLU 함수에 적용한다. 이 결과로부터 정보를 줄이기 위해 서브샘플링(sub-sampling) 방법의 하나로써 풀링(pooling)을 수행한다. 즉, 여러 값 중에서 일부 영역에서 1개의 평균값 또는 최댓값

을 취하게 된다.

합성곱-활성함수-풀링을 하나의 층처럼 반복하게 되며 특징학습 부분의 마지막 다차원 정보를 1차원으로 변환하는 평탄화(flattening)를 진행하여 분류의 입력으로 사용하게 된다. 분류 부분은 다층 퍼셉트론으로 구성되어 있으며, 노드들 간에 모두 완전히 연결(fully connected)된 구조이다. 최종적으로 출력층의 활성함수로 softmax 함수를 사용함으로써 입력영상의 특징이 각각의 범주들에 대한 확률을 출력하게 된다. 그림 3-7은 여러 사물과 사람이 함께 포함된 영상으로부터 CNN의 특징학습을 통해 분리된 각 형상의 특징으로부터 카테고리들 중의 하나로 분류하는 예를 보여 주고 있다.

1.4 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN)

인공지능 작업에 사용되는 많은 입력 정보와 출력 정보 쌍은 시간과 관계없이 즉시 입력에 대한 출력이 바로 결정된다. 다르게 말하면, 과거의 입출력 정보와 관계없이 현재의 입력정보로부터 결정된다. 하지만 음성 인식의 경우, 현재 발음되는 음절만을 가지고 단어를 유추하기에는 한계가 있다. 단어는 여러 음절의 조합으로 음절의 순서는 단어를 인식하는데 중요한 정보가 되기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1980년대부터 순환신경망(recurrent neural network, RNN)의 기초가 되는 인공신경망 기술이 개발되기 시작하였다. 순환신경망의 기본적인 구조는 그림 3-8에 나타나 있다.

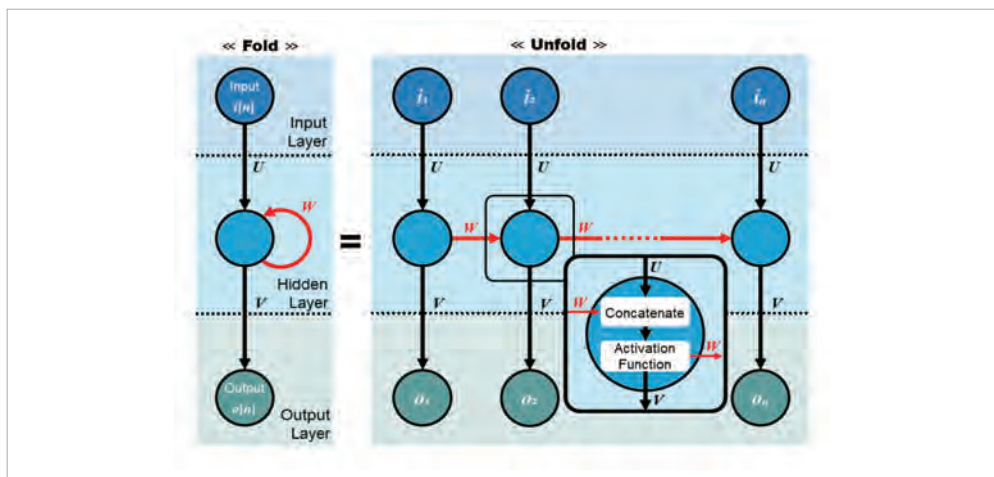


그림 3-8 Recurrent Neural Network (RNN) Architecture

왼쪽 그림은 순환신경망을 접어놓은 형태(fold)로 표현한 것이며, 오른쪽 그림은 순환신경망을 펼쳐놓은 형태(unfold)로 나타낸 것이다. 그림으로부터 은닉층의 노드에서 출력값에 가중치 W 를 곱하여 다음 단계에서 입력값과 연결(concatenated)되어 활성화함수의 입력이 된다는 것을 알 수 있다. 음성 인식 적용 시 음절 길이에 따라 데이터 크기가 달라지는 시계열(time series) 데이터는 입력 및 출력 신호의 크기를 정할 수 없어 이를 인공신경망에 적용하기 어려움이 있으나, 순환신경망은 데이터 길이에 관계없이 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 접혀진 순환신경망 구조에서 보면 은닉층 당 1개의 가중치 W 만 가지고 있어 가중치를 저장하는 메모리의 크기를 줄일 수 있다.

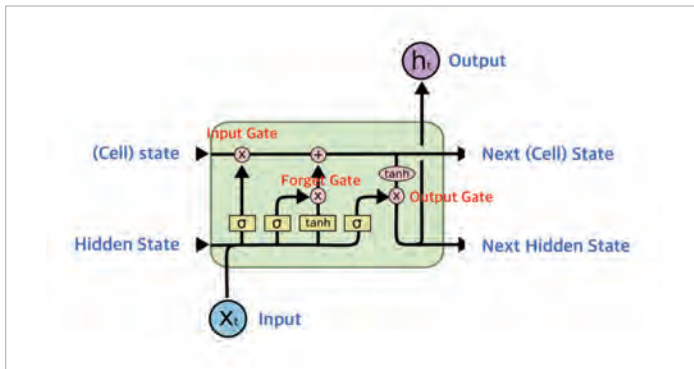


그림 3-9 Long Short-Term Memory (LSTM) Architecture (<https://wegonnamakeit.tistory.com/7>)

하지만 이러한 순환신경망은 현재 단계의 출력이 다음 단계의 입력에 영향을 주는 구조를 가지다 보니, 오랜 시간이 지나더라도 처음 단계의 출력이 반영되기는 하지만, 시간이 지남에 따라 이 영향이 점차적으로 적어져 초기 단계의 출력을 잃어 버린다는 단점을 가지고 있다. 때로는 이 초기 단계의 정보가 중요하므로 이러한 문제를 해결하기 위해 1997년 Sepp Hochreiter와 Jurgen Schmidhuber에 의해 순환신경망 중의 하나인 장단기메모리(long short-term memory, LSTM)가 제안되었으며, 그림 3-9는 이에 대한 간략한 구조를 보여준다.

또한, 이 장단기메모리의 변형 중 하나인 게이트 순환 단위(gated recurrent unit, GRU)는 2014년 조정현 교수에 의해 처음으로 제안되었으며, 장단기메모리가 가지고 있던 출력 게이트가 게이트 순환 단위에 존재하지 않아 적은 수의 가중치를 가지고 있음에도 불구하고

독립적인 2개 이상의 멜로디로 구성된 다성음악(polyphony) 학습과 음성 인식 분야에서 있어 장단기메모리에 비해 떨어지지 않는 성능을 보여준다. 이러한 구조는 그림 3-10에 나타나 있다.

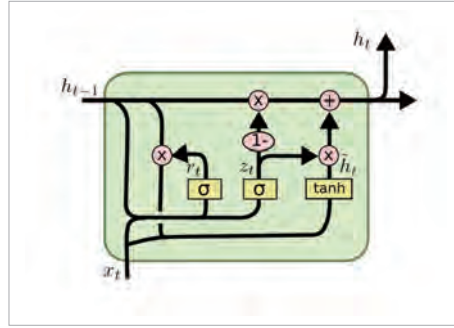


그림 3-10 Gated Recurrent Unit (GRU) Architecture (<https://itrepo.tistory.com/40>)

1.5 인공지능 작업(AI Tasks)

지금까지 인공지능의 하드웨어에 해당하는 인공신경망의 다양한 구조에 대해 학습하였다. 지금까지 학습한 인공신경망은 현재 존재하는 수많은 문제를 해결하기 위해 적용될 수 있으며, 이러한 문제들을 체계적으로 다음과 같은 인공지능 작업들(AI tasks)로 크게 분류하였다.

1.5.1 분류(Classification)

가장 대표적인 인공지능 작업으로 분류(classification)가 있다. 분류란 입력 정보에 따라 출력은 여러 개의 범주(category)들 중의 하나를 가지게 하는 것으로, 인공지능은 이러한 분류의 기준을 기계학습을 통해 습득하는 것이다. 분류에 사용되는 학습 데이터 세트는 입력 정보와 범주가 정해진 출력 정보로 구성되어 있다.

그림 3-11은 x 축과 y 축에 나타난 2개의 입력 정보에 따라 2개의 범주(녹색/청색) 중의 하나를 가지는 출력 정보를 그래프 상에 나타내고 있다. 기계학습을 통해 왼쪽 그래프(A)에서는 직선을 기준으로, 오른쪽 그래프(B)에서는 원을 기준으로 2개의 범주 영역으로 나누게 되어, 입력 정보에 대한 그래프 상의 위치에 따라 분류가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

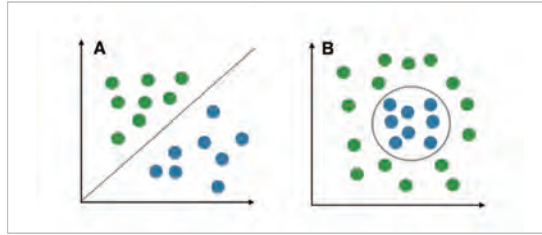


그림 3-11 Classification (https://sebastianraschka.com/Articles/2014_naive_bayes_1.html)

1.5.2 구분(Clustering)

구분(clustering)은 앞에서 설명한 분류와 비교하면 여러 개의 범주로 나눈다는 측면에서는 동일하지만, 입력 정보에 따른 출력 정보가 없다는 차이를 가지고 있다. 다시 말하자면, 학습 데이터 세트에 출력 정보 없이 입력 정보만 존재하므로, 이러한 입력 정보의 특징들로부터 데이터들을 나누어 분류하는 것이 구분의 인공지능 작업이다.

그림 3-12는 인공지능을 통한 구분 과정을 도식으로 보여 주고 있다. 먼저, 왼쪽의 그래프는 입력 정보에 따라 x축과 y축 좌표를 설정하고 출력 정보가 없으므로 모두 청색 점들로 표시하였다. 기계학습을 통해 각각 입력정보들의 특징을 나타내는 점의 위치를 바탕으로 비슷한 특징을 가진 점들을 모아 오른쪽 그래프처럼 청색, 녹색, 적색으로 나타낸 범주로 구분하게 된다. 최종적으로 학습을 한 후부터는 실제 데이터가 제공하는 입력 정보의 특징으로부터 가장 유사한 특징을 가진 3개의 범주 중 하나를 선택하게 된다.

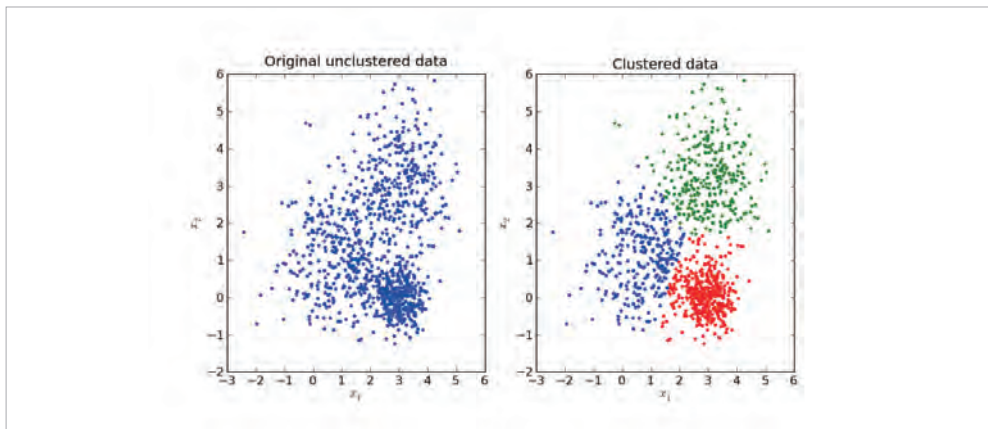


그림 3-12 Clustering (<http://sanghyukchun.github.io/69/>)

1.5.3 회귀(Regression)

회귀(regression)는 입력 정보와 출력 정보 간의 상관관계를 모델링하는 것으로 대표적인 인공지능 작업 중의 하나이다. 즉, 입력 정보는 독립변수가 되고, 출력 정보는 독립변수인 입력 정보와 관계를 맺는 종속변수가 된다. 일반적으로 입출력 상관관계를 선형 또는 비선형 함수로 표현할 수 있으며, 이를 또한 통계학적 분석 방법으로 계산할 수 있다. 하지만 이러한 상관관계가 수학적 함수로 표현될 수 없는 경우, 기계학습을 이용한 인공신경망을 적용하는 것이 매우 유용하다.

학습 데이터 세트는 입력 정보와 출력 정보의 쌍으로 구성되며, 이를 2차원 공간에 표현한 것이 그림 3-13의 왼쪽 그래프에 나타나 있다. 이들 학습 데이터로부터 기계학습을 통해 얻은 입력과 출력 간의 상관관계는 오른쪽 그림에서 적색 선으로 표시되어 있다.

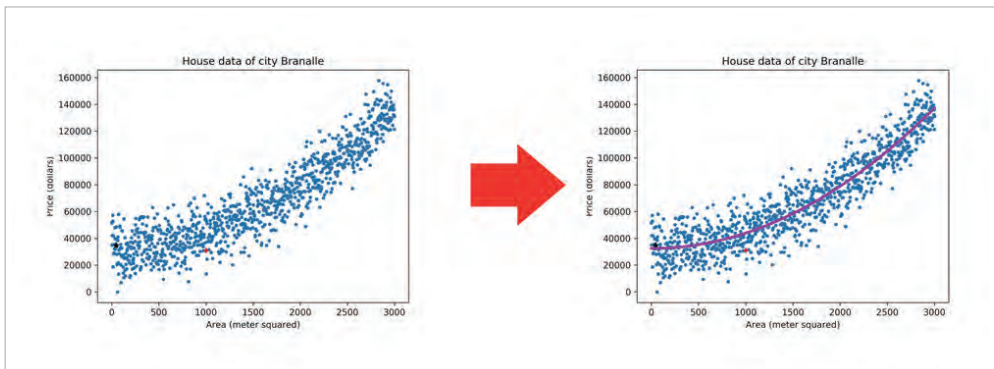


그림 3-13 Regression (<https://www.quora.com/What-is-regression-in-machine-learning>)

1.5.4 전사(Transcription)

전사(transcription)는 사전적 의미로는 손으로 옮겨 쓰는 것을 의미하지만, 인쇄술이 발달한 지금은 글이나 그림을 옮겨 쓰는 것이 아니라 음성을 듣고 옮겨 쓰는 받아쓰기(dictation)라는 의미로 인공지능 작업에서 사용된다. 그러므로 전사의 대표적인 예는 음성 인식이며 그림 3-14는 음성 정보로부터 성문(voiceprint)을 통해 어절을 구성하는 예를 보여 주고 있다. 시계열 음성 데이터로부터 성문을 추출하여 이를 입력 정보로 하여 이에 해당하는 음절을 출력하여 최종적으로 어절을 구성하는 구조를 가지며, 다양한 사람들이 발음하는 음절에 대

한 성문들로 구성된 학습 데이터 세트를 가지고 기계학습을 진행한다.

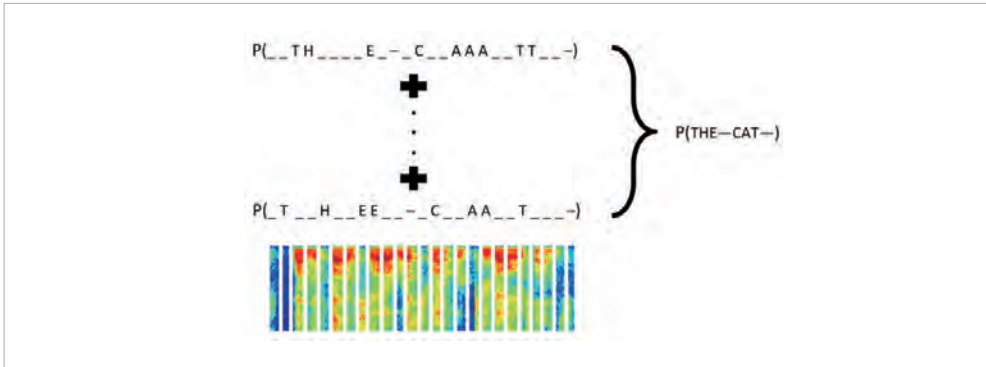


그림 3-14 Transcription

(<https://paperswithcode.com/paper/deep-speech-2-end-to-end-speech-recognition>)

1.5.5 기계번역(Machine Translation)

기계번역(machine translation)은 가장 널리 쓰이는 인공지능 기술이다. 대표적인 인공지능 작업의 예는 무료로 제공되는 구글번역(google translate) 서비스이다. 이 서비스는 2006년에 통계적 모델을 이용한 통계기계번역(statistical machine translation, SMT) 기반으로 제공되었으나, 2016년부터 구글신경기계번역(google neural machine translation, GNMT) 기반으로 바뀌었으며, 현재 100개가 넘는 언어에 대한 번역 서비스를 제공하고 있다. 구글번역은 이미 기계학습을 통해 기계번역의 기능을 수행하고 있지만, 번역 서비스에서 부족한 점을 사용자들의 의견을 받음으로써 빅데이터와 인공지능이 결합되어 실시간으로 업데이트를 제공하며 진화하고 있다.

1.5.6 구조화된 출력(Structured Output)

구조화된 출력(structured output)은 서로 다른 요소 간의 중요한 관계로 여러 값을 포함하는 데이터 구조를 가지는 출력을 벡터 형태로 가지고 있다. 이러한 인공지능 작업은 광범위한 범주를 가지며 앞에서 설명한 전사 및 기계번역 또한 포함된다. 이의 대표적인 예는 바로 구문분석(parsing)과 픽셀단위분할(pixel-wise segmentation)이다.

구문분석은 자연어로 구성된 문장을 구성하는 각각의 단어들을 동사, 명사, 형용사, 부사

등으로 배정한 문법 구조를 기술하는 트리로 만드는 것으로, 이에 대한 예가 그림 3-15에 나타나 있다. 또한, 픽셀단위분할은 픽셀로 구성된 영상에서 객체를 구분하여 이를 픽셀 단위로 분할하는 것이다. 이러한 인공지능 작업은 문장을 구성하는 단어를 성분별로 또는 영상을 구성한 객체들을 분할한 형상별로 구성된 구조화된 출력을 가진 학습 데이터 세트를 이용하여 기계학습을 진행하는 것이다.

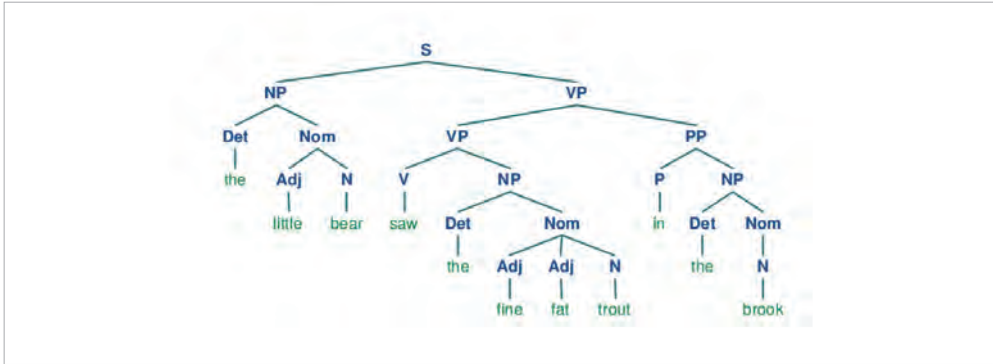


그림 3-15 Structured Output (Parsing) (<https://www.nltk.org/book/ch08.html>)

1.5.7 이상감지(Anomaly Detection)

이상감지(anomaly detection)는 일련의 사건이나 개체들을 모니터링하면서 비정상적(unusual)이거나 비정형적(atypical)인 것을 표시하는 인공지능 작업이다. 그림 3-16은 이상감지의 대표적인 형태를 보여 준다. 시간이 지남에 따라 일정한 범위 내에 존재하는 값이 어느 순간 이 범위를 크게 벗어나게 되면 이를 표시하게 된다.

이상감지의 대표적인 예는 신용카드사기(credit card fraud) 감지이다. 신용카드 사용자는 자신만의 고유한 소비 패턴을 보이고 있으며, 일반적으로 이 패턴을 많이 벗어나지 않는다. 하지만 평소의 소비 패턴과 다른 형태를 보이기 시작할 때 비정상적임을 감지하게 되고, 이를 사용자에게 알려 사용 여부를 확인하게 된다. 이상감지는 또한 산업분야에서도 많이 사용할 수 있다. 공장에서 사용하는 다양한 제조장비들을 구성하는 부품들은 일정한 수명을 가지고 있으나, 부품 각각의 수명은 예측하기 어려워 부품의 갑작스러운 고장으로 인해, 부품 교체로 인한 시간 및 금전적인 손실이 발생할 수 있다. 그러므로 핵심 부품들의 성능지표들을 시

간에 따라 모니터링함으로써 조기에 이상감지를 확인하여 장비 정비를 미리 준비함으로써 손실을 사전에 예방할 수 있다. 이러한 인공지능 작업은 입력 정보에 대한 정상과 비정상의 출력력을 지니는 다양한 학습 데이터 세트를 구성하여 기계학습을 통해 구현할 수 있다.

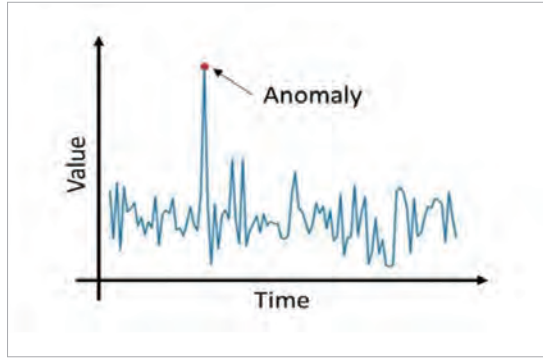


그림 3-16 Anomaly Detection

(<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/08/univariate-time-series-anomaly-detection-using-arima-model/>)

1.5.8 합성 및 샘플링(Synthesis and Sampling)

합성 및 샘플링(synthesis and sample)은 멀티미디어 응용 분야에 특히 유용한 인공지능 작업으로, 학습 데이터 세트들로부터 새로운 데이터를 생성하는 것이다. 먼저 영상 분야에서 대표적인 예가 바로 딥페이크(deep fake)이다. 이는 기존 사람의 얼굴에 다른 사람의 얼굴을 합성하는 것으로, 단순히 정지 영상(still image)뿐만 아니라 사람의 표정을 샘플링하여 다른 사람 얼굴에 그 표정까지도 포함하는 동영상(video)을 합성하는 것이다.

그림 3-17에는 음성 분야에서 대표적인 음성합성(speech synthesis)을 나타내었다. 먼저 음성 인식을 통해 알려진 각 음절마다 주파수 특성 정보를 바탕으로 입력된 문장을 음절별로 분리한다. 이후 해당 음절의 주파수 정보를 샘플링하여 특정 사람이 가진 고유한 음색과 합성함으로써 마치 특정 사람이 말하고 있는 것처럼 음성을 합성하는 인공지능 작업이다. 이러한 합성 및 샘플링을 하기 위해서는 특정 사람의 표정이나 음성 정보를 포함한 입력 데이터 세트와 함께, 최종 합성 결과물인 동영상과 음성을 평가할 수 있는 지표를 가지고 기계학습을 수행함으로써 진행된다.

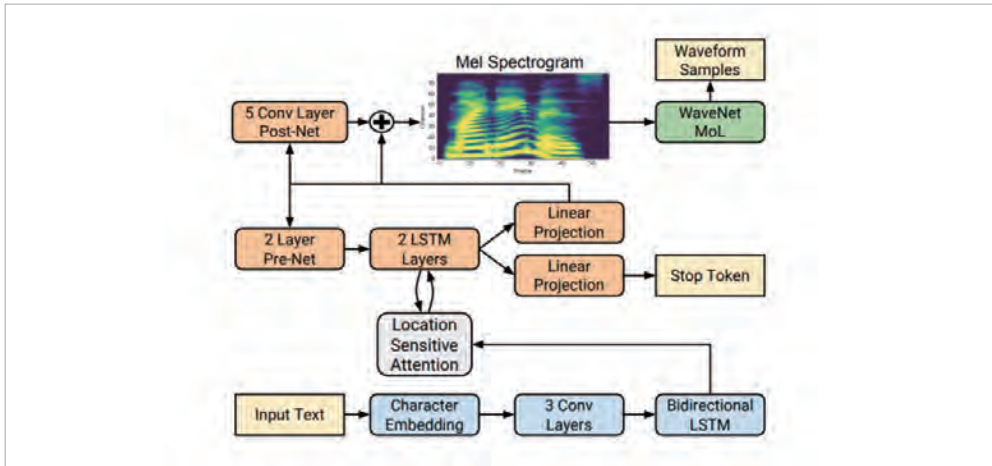


그림 3-17 Speech Synthesis

(<https://heartbeat.fritz.ai/a-2019-guide-to-speech-synthesis-with-deep-learning-630afcafb9dd>)

1.5.9 결측값 대체(Imputation of Missing Values)

결측값 대체(imputation of missing values)는 연속되는 데이터에서 결측값이 존재할 때 그 값을 추정하는 것을 의미한다. 그러므로 결측값이 존재하는 위치의 전과 후 데이터를 이용하여 이를 예측하는 것이 바로 인공지능 작업이 된다. 기계학습을 위해서는 결측값 위치의 데이터를 제외한 값들이 입력 정보가 되고, 결측값 위치의 실제 값이 출력 정보가 되어 학습 데이터 세트가 구성되어야 한다.

1.5.10 잡음 제거(Denoising)

잡음 제거(denoising)는 원하는 정보인 신호와 원하지 않는 정보인 잡음을 분리하여 잡음을 제거하는 것으로, 인공지능 작업의 전처리에 꼭 필요한 과정이다. 기존의 잡음 제거는 통계학적인 수학 모델을 통해 수행하였으나, 점차 인공지능을 이용한 잡음 제거 작업이 진행되어 가고 있다. 그림 3-18은 필기체 인식을 하기 전에 인공지능을 이용하여 잡음 제거 작업을 진행하는 과정을 보여 주고 있다. 잡음이 많이 유입된 필기체 영상이 부호기(encoder)와 복호기(decoder)를 거치며 잡음이 제거된 필기체 영상으로 바뀌게 된다. 즉, 부호기와 복호기를 통하는 과정 중에 잡음이 제거되며 이러한 인공지능 기법을 오토인코더(autoencoder)라고 부른다. 이러한 작업에 대한 기계학습 과정은 잡음 있는 신호를 입력, 잡음 없는 신호를 출

력으로 하여 학습 데이터 세트를 구성하고, 오토인코더를 통해 얻어진 신호와 출력 비교를 통해 오차를 줄이도록 학습한다.

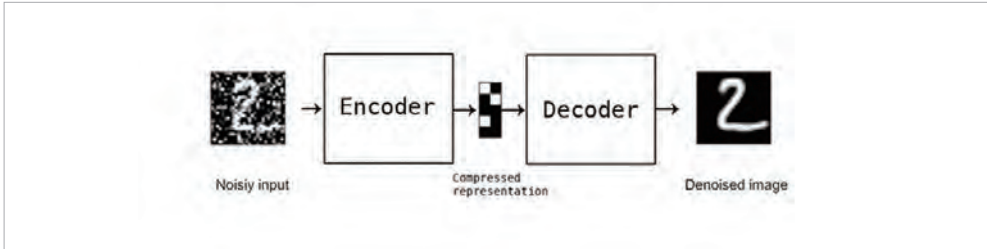


그림 3-18 Denoising

(<https://www.pyimagesearch.com/2020/02/24/denoising-autoencoders-with-keras-tensorflow-and-deep-learning/>)

1.5.11 밀도 추정 또는 확률질량함수 추정(Density Estimation or Probability Mass Function Estimation)

밀도 추정(density estimation) 또는 확률질량함수 추정(probability mass function estimation)은 주어진 제한된 데이터에 대한 확률 값을 바탕으로 확률밀도함수 또는 확률질량함수를 추정하는 인공지능 작업이다. 출력은 정해진 확률분포이고, 입력은 이를 따르는 제한된 수의 데이터가 되어 기계학습을 통해 계산된 확률분포와 출력인 실제 확률분포를 비교하여 이 차이를 줄이는 방향으로 학습이 진행된다. 그림 3-19는 밀도 추정의 예를 보여 준다. 그래프의 x

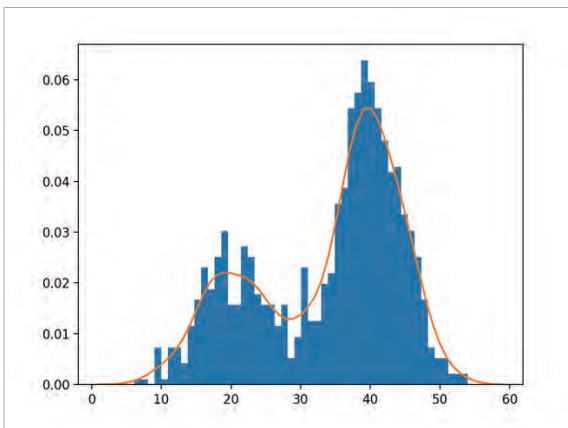


그림 3-19 Density Estimation or Probability Mass Function Estimation

(<https://machinelearningmastery.com/probability-density-estimation/>)

축에 설정된 전체 구간 값 중의 하나를 가지는 데이터를 구간 값의 빈도(frequency)에 대해 작성한 히스토그램(histogram)으로부터 실제 확률분포를 추정한 결과가 주황색으로 표시되어 있다.

2. 기계학습

지금까지 앞선 절에서는 인공지능의 개념과 현재까지 가장 많이 사용되는 인공신경망의 종류와 그 특징 및 인공지능 작업과 응용 예에 대해 간략하게 알아보았다. 하지만 인공신경망의 구조에 대해 학습하였으나, 이러한 구조의 핵심이 되는 매개변수(parameter) 값을 결정하는 방법에 대해서는 논의하지 않았다. 이번 절에서는 학습에 사용되는 데이터 세트를 이용하여 최적의 매개변수 값을 찾는 과정 또는 알고리즘인 기계학습에 대해 알아보도록 한다.

기계학습이란 앞선 절에서 구성된 다양한 인공신경망들에서 결정되어야 하는 매개변수 값인 가중치(weighting value)를 조율(tuning)하는 과정을 의미한다. 즉, 학습 내용인 주어진 입력값에 대해 출력값이 대응되는 준비된 훈련 데이터 세트(training data set)를 가지고 인공신경망에 입력값을 적용했을 때, 계산되는 출력값을 예상되는 출력값(훈련 데이터 세트의 출력값)과 비교함으로써 이 오차를 최소화할 수 있는 가중치의 최적화된 값을 구하는 전반적인 과정을 기계학습 과정이라고 할 수 있다.

이러한 기계학습의 대표적인 방법은 크게 지도학습(supervised learning, SL)과 비지도학습(unsupervised learning, UL), 강화학습(reinforcement learning, RL)으로 분류할 수 있다. 지도학습은 입력과 출력이 쌍으로 구성된 학습 데이터 세트로부터 인공신경망이 입력에 대한 출력의 정해진 규칙(rule)을 가지도록 가중치를 조율하는 방법을 의미한다. 비지도학습은 주어진 입력에 대해 정해진 출력값은 없지만, 입력이 가진 동일한 속성(property)들을 기반으로 구분(clustering)할 수 있도록 가중치를 조율하는 방법이다. 마지막으로, 강화학습은 현재 주어진 상황에서 보상(reward)을 최대화할 수 있는 방향으로 가중치를 조율하는 방법이다.

기계학습의 대표적인 방법들에 대해 설명하기에 앞서 기계학습을 하기 위해 필요한 기본적인 개념에 대해 먼저 알아보도록 한다.

2.1 개요

2.1.1 비용함수(Cost Function)

학습에는 성취도 달성 여부를 위한 평가 기준이 필요하다. 인공지능 학습 성취도를 평가하는 척도(measure)가 바로 비용함수(cost function)이다. 이 척도는 학습에 목적을 두고 있으

므로 목적함수(object function) 또는 추구하고자 하는 학습 정도에 얼마나 못 미쳤는지를 나타내므로 손실함수(loss function)라고도 불린다. 명칭은 다양하지만 학습의 정도는 입력 정보로부터 계산 또는 추정되는 출력 정보와 실제 출력 정보와의 차이를 수학적으로 나타낸다. 이 차이의 크기는 일반적으로 두 값의 거리로 정의될 수 있으므로, 벡터의 노름(norm)을 이용하여 이러한 비용함수를 정의할 수 있다. 기계학습의 목표는 이 비용함수 값을 최소화하는 것이다. 이어지는 다음의 3개 소절에서는 이러한 비용함수를 최소화할 수 있는 알고리즘에 대해 학습한다.

2.1.2 역전파(Backpropagation)

앞의 소절에서 기계학습의 목표를 정의하였다면, 이번 소절에서는 기계학습의 목표를 달성하는 방법의 기본이 되는 역전파(backpropagation) 알고리즘에 대해 알아본다. 즉, 이 알고리즘은 비용함수가 최솟값을 가지도록 인공신경망에 존재하는 수많은 가중치를 가진 매개변수 값을 조율하는 방법을 포함하고 있다.

인공신경망에서 출력값은 입력값과 가중치의 조합에 의해 계산되며, 이 계산 방향은 정방향이다. 이렇게 계산된 출력값과 실제 출력값 사이의 거리로 표현되는 비용함수를 줄이기 위해 가중치에 대한 비용함수의 변화율을 계산하여, 비용함수 값이 작아지는 방향으로 가중치의 값을 업데이트하게 된다. 여러 개의 은닉층이 있는 경우는 출력층에 가장 가까운 은닉층부터 업데이트가 되어 순차적으로 출력에서 입력 방향, 즉 인공지능망의 전파와 반대 방향인 역전파 방향으로 진행된다. 이 과정을 그림 3-20에 나타내었다.

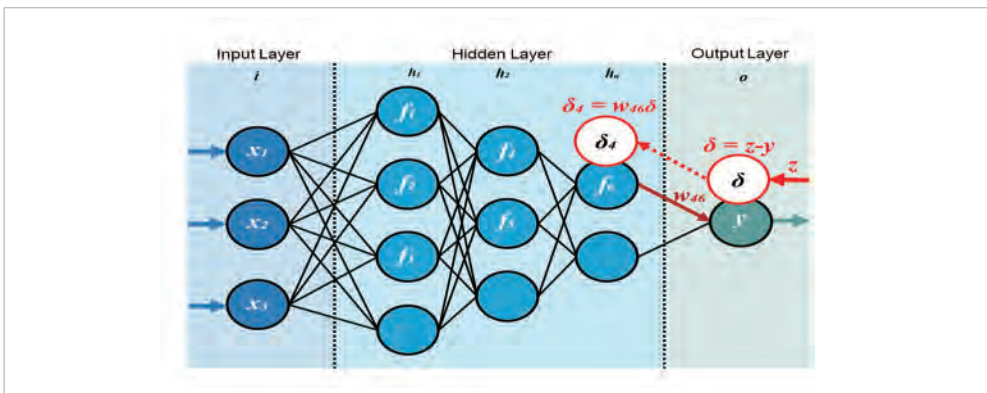


그림 3-20 Backpropagation Algorithm

2.1.3 경사하강법(Gradient Decent)

앞의 소절에서 설명한 역전파 알고리즘은 비용함수 값이 최소화되도록 가중치를 가진 파라미터 값들을 업데이트하는 방법에 대해 제시한 것이다. 하지만 이는 비용함수가 최솟값을 향해 가는 방향을 알고 있는 경우 매우 유용하므로, 비용함수가 감소하는 방향을 찾는 것이 매우 중요하다. 그러므로 1개의 입력 변수를 가지는 비용함수의 감소 방향은 비용함수의 도함수(derivative), 즉 기울기의 반대 방향으로 이동하여 이로부터 반복적으로 적용하여 비용함수의 최솟값을 찾게 된다. 여러 개의 입력 변수를 가지는 비용함수에서는 비용함수의 기울기를 경사(gradient)라고 부르게 되므로, 일반적으로 이 방법을 경사하강법(gradient decent)이라고 한다. 그림 3-21에 경사하강법의 개념에 대해 나타냈으며, 이를 통해 경사하강법은 미분 가능한 함수의 지역최솟값(local minimum)을 찾는 1차 반복 최적화 알고리즘이라는 것을 알 수 있다.

여기서 중요한 점은 경사하강법을 적용하기 위해서는 비용함수의 도함수인 경사를 분석해(analytical solution)로 구해야 한다는 것이다. 하지만 대부분의 비용함수에서 분석해를 구할 수 없으므로, 기계학습에 주어진 학습 데이터 세트 전부를 적용하여 구한 경사값의 평균값을 사용하게 되며 이러한 방법을 배치 경사하강법(batch gradient descent)이라고 부른다.

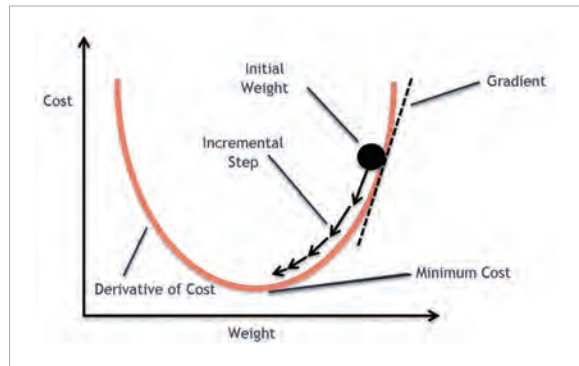


그림 3-21 Gradient Decent Concept(<https://towardsdatascience.com/batch-mini-batch-stochastic-gradient-descent-7a62ecba642a>)

2.1.4 확률적 경사하강법 (Stochastic Gradient Decent)

앞 소절에서 설명한 배치 경사하강법은 학습 데이터 전부를 사용하므로, 학습 데이터의 크기가 클수록 계산 시간이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 경사하강법의 변형인 확률적 경사하강법(stochastic gradient decent, SGD)이 제안되었다. 이는 학습 데이터 전체를 사용하는 것이 아니라, 1개의 학습 데이터에 대해 경사하강법을 적용하는 방법이다. 그림 3-22는 확률적 경사하강법과 기존의 경사하강법이 반복적으로 수렴해 가

는 과정을 보여주고 있다.

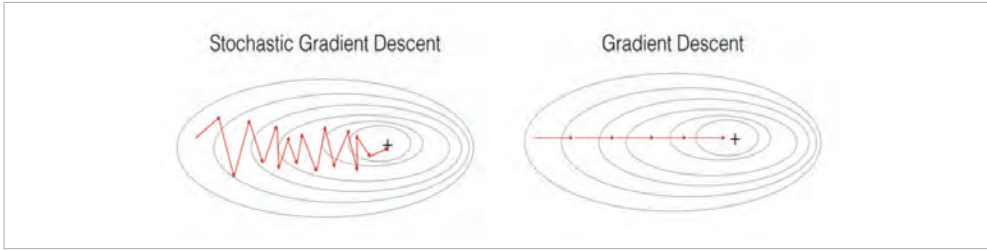


그림 3-22 Comparison of Stochastic Gradient Descent and Gradient Descent(<https://light-tree.tistory.com/133>)

확률적 경사하강법은 1개의 데이터를 사용하여 계산하므로 정확하진 않다. 대략적인 경사 방향을 찾기 때문에 다소 부정확하지만 사용되는 데이터 크기가 작으므로 계산이 매우 빠르다는 장점을 가지고 있다. 또한 초기 단계에서 비용함수 최적화 위치에 대한 오차가 크지만, 최종 단계로 갈수록 통계적으로 오차를 줄이게 된다. 또한, 지역최솟값(local minimum)보다 전역최솟값(global minimum)으로 수렴할 가능성이 상대적으로 크다는 장점을 가지고 있다.

확률적 경사하강법의 정확도를 높이면서 계산 시간을 빠르게 하기 위해, 1개의 데이터를 사용하는 대신 전체 학습 데이터인 배치를 여러 개로 나눈 미니 배치로 분할하고, 이 미니배치를 경사하강법에 적용하는 것을 미니배치 경사하강법(mini-batch gradient descent, MGD)이라고 한다. 미니배치 경사하강법과 확률적 경사하강법과의 수렴하는 과정을 비교한 것이 그림 3-23에 나타나 있다.

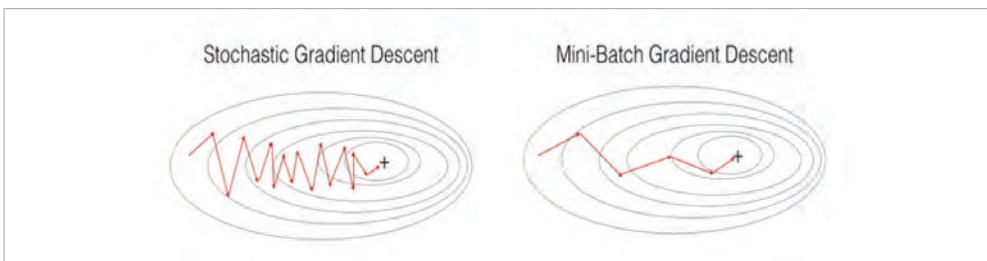


그림 3-23 Comparison of Stochastic Gradient Descent and Mini-Batch Gradient Descent
(<https://light-tree.tistory.com/133>)

2.1.5 데이터 세트(Data Set)

기계학습에 있어 데이터 세트는 가장 중요한 요소이며, 이로부터 학습 데이터 세트를 구성할 수 있다. 하지만 모든 데이터 세트를 학습 데이터 세트로 사용할 수는 없다. 기계학습은 학습 과정도 중요하지만 학습 성취도도 함께 평가되어야 하기 때문이다. 예를 들어 학생이 수학문제를 모두 학습할 때 사용한다고 해보자. 이때 평가 시험에서 학습 때와 동일한 시험문제를 풀게 되면, 이 학생은 100점을 맞겠지만 이러한 학습내용을 얼마나 잘 이해했는지는 알 수 없다. 그러므로 기계학습에 사용되는 데이터 세트는 크게 훈련 데이터 세트(training data set)와 테스트 데이터 세트(testing data set)로 나누게 되고, 학습 시에는 훈련 데이터 세트를 사용하고, 학습 후 평가 시에는 테스트 데이터 세트를 사용하게 된다.

이때 훈련 데이터 세트를 모두 학습에 사용하게 된다면, 평가를 받기 전에 얼마나 잘 학습이 되었는지를 알 수 없다. 앞의 학생을 예로 들자면 학생이 평가 시험을 보기 전에 학습한 내용을 얼마나 잘 이해했는지 스스로 평가하기 위해 모의평가를 보고 이 모의평가 결과에 따라 추가적인 학습 여부를 결정하게 된다. 그러므로 기존의 훈련 데이터 세트를 다시 훈련 데이터 세트와 검증 데이터 세트(validation data set)로 분할하고, 기계학습 시 학습 후 자체 평가를 위해 검증 데이터 세트를 사용한다.

데이터 세트를 어느 정도 크기로 훈련 데이터 세트, 테스트 데이터 세트 그리고 검증 데이터 세트로 나누어야 하는지에 대한 정확한 정답은 없다. 하지만 일반적으로 전체 데이터 세트에서 훈련 데이터 세트와 테스트 데이터 세트를 8 대 2의 비율로 나누며, 이렇게 분할된 훈련 데이터 세트에서 다시 훈련 데이터 세트와 검증 데이터 세트를 8 대 2의 비율로 나눈다. 그림 3-24는 이러한 분할 과정을 도식으로 보여 준다.

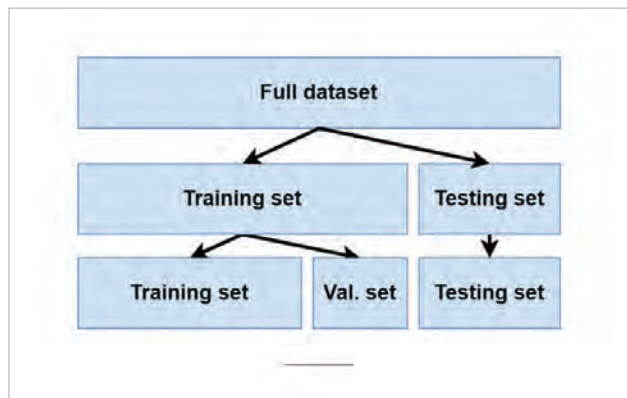


그림 3-24. Configuration for Training, Testing, and Validation Data Sets
<https://www.facebook.com/1528799847403947/photos/pcb.2855053801445205/2855053491445236/?type=3&theater>

2.2 지도학습(Supervised Learning)

다양한 지도학습 방법들이 현재까지 제안되고 개발되고 있다. 이번 절에서는 이 중에서도 대표적인 지도학습법인 확률적 지도학습, 서포트벡터머신, k-최근접이웃, 그리고 결정트리 방법에 대해 알아본다.

2.2.1 확률적 지도학습(Probabilistic Supervised Learning)

확률적 지도학습(probabilistic supervised learning)은 학습 데이터 세트를 이용하여 확률 분포(probability distribution)의 추정에 기반을 두고 있다. 이는 널리 알려진 대표적인 추정 기법인 최대우도추정(maximum likelihood estimation, MLE)을 이용하여 구현할 수 있다. 이의 대표적인 예는 바로 앞에서 설명한 회귀 작업이며, 확률적 분포에 따라 회귀모델을 생성하게 된다. 대표적인 회귀모델로는 선형회귀(linear regression)와 로지스틱회귀(logistic regression)가 있다.

선형회귀는 학습 데이터 분포에 가장 잘 맞는 직선으로 맞춤을 하는 방법이다. 하지만 데이터의 분포 특성에 따라 항상 직선에 맞출 수는 없으므로, 직선 대신 시그모이드 함수(sigmoid function)를 이용한 로지스틱회귀 방법을 사용할 수 있으며, 그림 3-25에서 보는 바와 같이 주어진 데이터 분포에 따라 선형회귀보다 로지스틱회귀가 더 적합하다는 것을 알 수 있다.

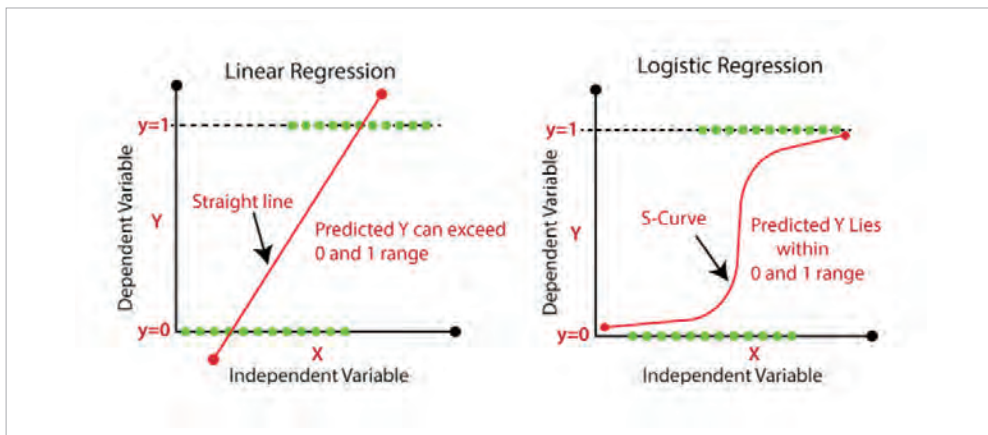


그림 3-25 Linear Regression vs. Logistic Regression

(<https://velog.io/@jeromecheon/ML-6편-Linear-tasks-Logistic-Regression과-Gradient-Decent>)

2.2.2 서포트벡터머신(Support Vector Machines)

서포트벡터머신(support vector machine, SVM)은 대표적인 지도학습 방법이며, 분류 작업에 가장 강력하게 사용된다. 서포트벡터머신은 분류를 결정하는 기준이 되는 선인 결정경계(decision boundary)를 결정하는 지도학습 모델이다.

그림 3-26에서 보는 바와 같이 적색점과 청색점, 2개의 그룹으로 학습 데이터를 분류할 수 있다. 이때, 결정경계 중의 하나가 바로 굵은 실선이며, 이러한 결정경계는 1개만 존재하는 것이 아니라 무수히 많이 존재한다. 이 결정경계가 위치할 수 있는 최소한의 경계가 1개의 데이터와 만나는 직선이 되며, 이 직선이 점선으로 적색점 집단과 청색점 집단에 각각 1개씩 존재한다. 이 결정경계는 2개 집단으로부터 서로 가장 멀리 떨어져 있어야 최적의 분류 예측을 할 수 있으므로, 두 점선 사이의 중앙인 굵은 실선이 최적의 결정경계가 되며, 서포트벡터 머신은 이러한 최적의 결정경계를 예측해 주는 방법이다.

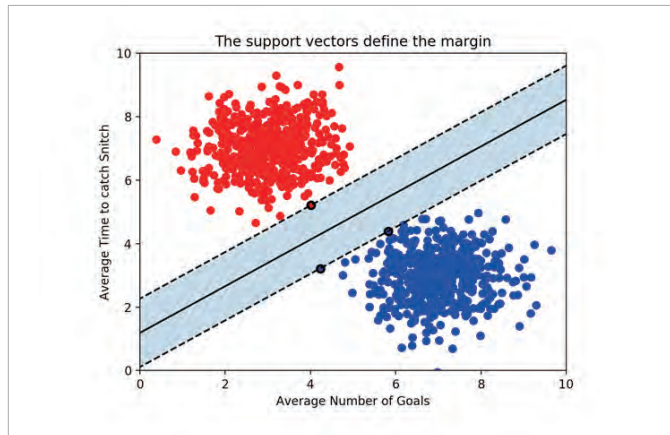


그림 3-26 Support Vector Machine Concept (<https://hleeceaster.com/ml-svm-concept/>)

2.2.3 k-최근접이웃(k-Nearest Neighbors)

k-최근접이웃(k-nearest neighbors, kNN)은 비모수방식(non-parametric)의 게으른 학습(lazy learning) 알고리즘이다. 즉, 주어진 학습 데이터 세트만을 가지고 통계적 모델이 구성되고 있으며, 모델을 생성하기 위해 별도의 학습이 없으며 단지 작업에 학습 데이터 세트를 바로 사용하게 된다. 하지만 이 방법은 학습 시간은 거의 없으나 작업 시 입력 정보에 대한 모든 학

습 데이터 세트와 관계를 항상 계산해야 하므로 계산 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다.

k-최근접이웃은 입력 정보와 학습 데이터 세트의 정보 간의 거리를 먼저 계산하고, 이 중에서 입력 정보와 가장 근접한 k 개의 학습 데이터 세트 정보를 구한다. 이 학습의 대표적인 응용은 분류와 회귀 작업으로, 분류 작업은 이러한 k 개 정보 대다수가 속한 범주를 바로 입력 정보의 범주로 출력하고, 회귀 작업은 이러한 k 개 정보의 평균값(mean) 또는 중앙값(median)에 해당하는 회귀 결과를 출력한다.

그림 3-27은 k-최근접이웃을 이용한 분류 작업의 예를 보여주고 있다. 입력 점의 위치와 학습 데이터 점의 위치 간의 거리를 먼저 계산하였다. 이 결과, k=3일 때, 적색점은 1개, 녹색점이 2개가 최근접이웃이므로, 입력은 “녹색”으로 분류되지만, k=7일 때, 적색점은 4개, 녹색점은 3개가 최근접이웃이므로 입력은 “적색”으로 분류된다. 그러므로 k 값에 따라 분류 특성이 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다.

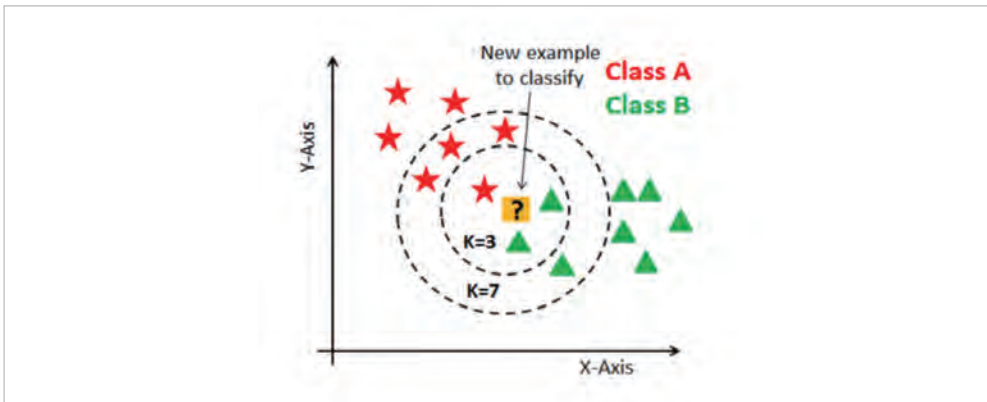


그림 3-27 k-Nearest Neighbors Example

(<https://ai.plainenglish.io/introduction-to-k-nearest-neighbors-knn-algorithm-e8617a448fa8>)

2.2.4 결정트리(Decision Tree)

결정트리(decision tree)는 일반적으로 의사결정을 함에 있어 결정 규칙과 이에 따른 결과를 트리 형식으로 구조화함으로써 의사 결정을 지원하는 방법이다. 이를 기계학습에 적용하게 되면 입력 정보에 결정 규칙을 적용하여 의사 결정이 바로 출력 정보가 되는 것이다. 다

시 말하면, 결정 규칙에 따라 입력 정보와 출력 정보를 연결시켜 주는 예측 모델이 되는 것이다.

3개의 숫자 A, B, C의 관계를 구하는 결정트리의 예가 그림 3-28에 나타나 있다. 먼저 A와 B의 크기를 비교하여 가지를 치게 되며, 다음으로 B와 C를 비교한다. 이때, 3개 숫자의 크기를 결정할 수 있으면 가지치기를 멈추고 결과를 출력하지만, 그렇지 않으면 추가적인 가지를 만들어 최종적으로 3개 숫자의 관계를 모두 도출하게 된다.

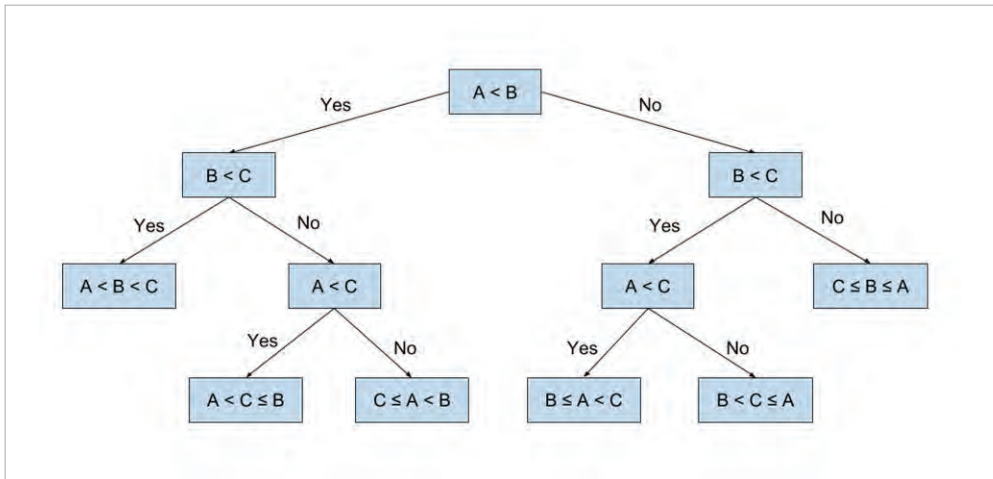


그림 3-28 Decision Tree Example (<https://elf11.github.io/2018/07/01/python-decision-trees-acm.html>)

2.3 비지도학습(Unsupervised Learning)

이번 절에서는 비지도학습의 구체적인 알고리즘에 대해 살펴본다. 주성분분석과 k-평균 구분 방법이 대표적이며, 이들 방법의 특징들에 대해 살펴본다.

2.3.1 주성분분석(Principal Components Analysis)

주성분분석(principal components analysis, PCA)은 높은 차원의 데이터를 낮은 차원의 데이터로 변환하는 방법으로, 데이터들 간의 주요한 선형 관계를 찾는 것이다. 인공지능의 관점에서 보면, 이들 데이터의 다양한 특징을 나타내는 값들이 입력 정보로 구성되고 이를 통해 주요한 특징들 간의 주요 선형 관계가 출력 정보가 된다. 이 작업을 통해 선형 관계가 낮

은 특징들은 제외되어 주요한 특징들만 출력에 반영되므로 데이터를 낮은 차원으로 변환하는 것이며, 입력 정보만을 가지고 출력 정보를 생성하므로 비지도학습의 대표적인 방법이 된다.

그림 3-29는 주성분분석의 대표적인 예를 보여준다. 왼쪽 그림 A는 분석하고자 하는 물고기들을 나타내고 있으며, 이 물고기의 대표적인 특징으로 물고기의 길이와 폭을 선정하고 모든 물고기에 대해 이 값들을 수집한다. 이후, 이러한 특징 정보들로부터 주성분분석을 수행하였으며, 결과로 오른쪽 그림 B에서 보는 바와 같이 주성분분석은 길이와 폭 간의 선형적인 관계를 가지는 직선을 출력한다. 이 예에서는 단지 2개의 특징만으로 선형 관계를 찾았지만, 이외의 추가적인 특징을 입력 정보로 입력하였을 때는 강한 선형 관계, 즉 주성분들 간의 관계만을 제공한다.

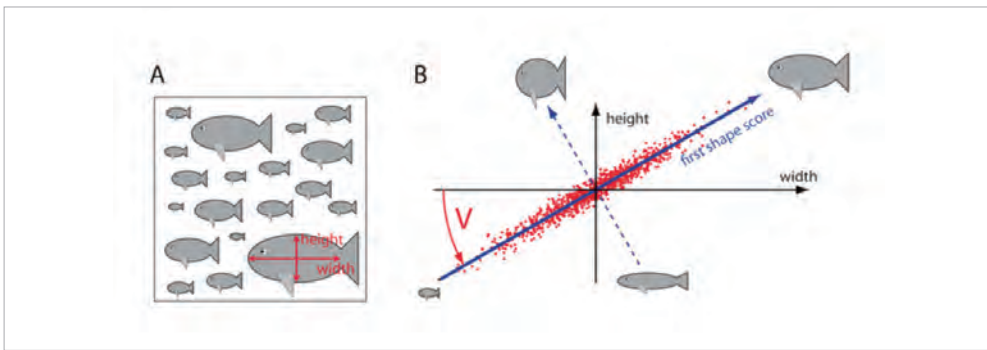


그림 3-29 Principal Components Analysis Example
(<https://m.blog.naver.com/dic1224/221480008584>)

2.3.2 k-평균구분(k-Means Clustering)

k-평균구분(k-means Clustering)은 k 개의 묶음으로 나누는 작업으로, 입력 정보만을 가지고 입력 정보 각각을 묶음 중의 하나로 구분하는 비지도학습 방법이다. 그림 3-30에 나타난 바와 같이 입력 정보는 왼쪽 그림에 분포되어 있고 구분되어 있지 않지만, k-평균구분 방법을 적용한 후 오른쪽 그림과 같이 3개의 묶음으로 구분되어 있음을 알 수 있다.

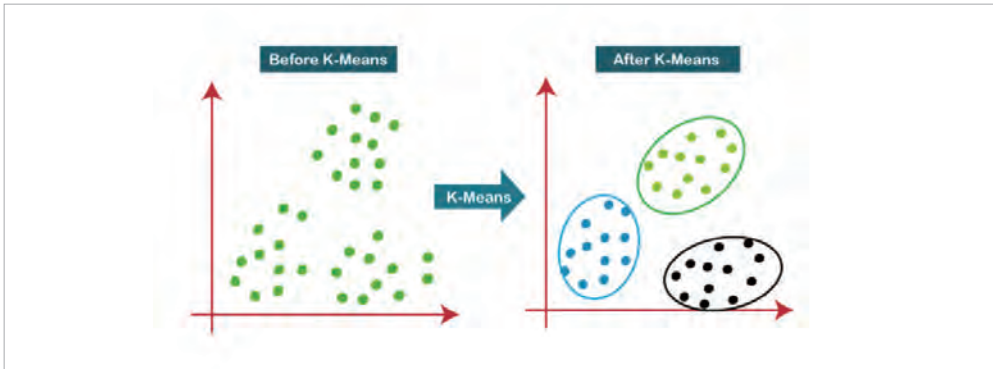


그림 3-30 k-means Clustering

(<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/04/k-means-clustering-simplified-in-python/>)

k-평균구분의 구분 기준은 입력 정보와 각 k 개의 묶음에 속해 있는 정보 평균값과의 거리와 관련된 비용함수의 최소화에 기반을 두고 있다. 즉, 입력 정보가 k 개 묶음 중의 하나에 속한다고 가정하고, 각 묶음의 정보 평균값과 입력 정보 간의 거리를 합한 후, 입력 정보가 어느 묶음에 속했을 때 가장 비용함수를 최소화하는지에 따라 그 입력 정보가 속해야 하는 묶음을 출력으로 제시한다.

2.4 강화학습(Reinforcement Learning)

강화학습은 주어진 환경하에서 일련의 사건에 대한 행동 또는 선택에 따라 보상을 제공함으로써, 시도와 실패(trial and error)를 통해 보상을 최적화 또는 극대화하도록 하는 학습 방법이다. 즉, 행동 또는 선택한 결과에 따른 보상을 피드백으로 받아 행동 또는 선택 방법을 최적화하게 된다. 규칙을 알려 주지 않고 그 규칙을 스스로 찾아갈 수 있도록 결과에 따라 보상을 제공하는 것으로, 이는 규칙을 알려주고 학습하는 지도학습과는 다른 개념이다.

강화학습의 대표적인 예는 알파고이다. 알파고는 바둑 게임에 최적화된 인공지능망으로서, 기계학습 알고리즘으로 지도학습과 강화학습을 결합한 형태로 구성되어 있다. 알파고가 바둑 게임 학습을 진행하면서 주어진 평가 기준에 따라 점수를 부여함으로써 높은 점수를 받을 수 있도록 바둑의 규칙을 습득하게 되어 바둑을 두는 순서를 결정하게 된다.

3. 마치며

지금까지 인공지능망의 하드웨어를 구성하는 인공지능 모델과 이의 소프트웨어를 구성하는 기계학습 방법에 대해 학습하였다. 대표적인 인공지능 모델로 딥러닝이 가능한 다층 퍼셉트론(MLP) 모델, 합성곱 신경망(CNN) 모델, 그리고 순환신경망(RNN) 모델의 구조에 대해 알아보았으며, 기계학습의 기본이 되는 비용함수와 이의 최적화 의미와 방법, 그리고 데이터 세트 구성 방법을 살펴보았다. 또한, 기계학습 방법의 분류에 따라 지도학습, 비지도학습 및 강화학습의 대표적인 기술들을 이해하였다.

이 외에 다양한 인공지능 모델과 기계학습 방법이 있으며, 인공지능과 기계학습의 기초가 되는 내용 외에도 주요한 요소인 학습 횟수에 따라 변화하는 학습 성취도 과적합(overfitting) 및 과소적합(underfitting)과 관련한 적합(fitting) 문제, 과적합(overfitting)을 방지하기 위한 정규화(regularization) 문제들과 같은 기계학습의 실무적인 내용에 대한 부분도 지속적으로 학습해야 할 것이다.

마지막으로 인공지능 및 기계학습은 지속적으로 발전하고 있는 학문 분야로 앞으로도 이와 관련된 많은 기술들이 개발될 것으로 예상된다. 하지만 인공지능 및 기계학습이 적용 가능한 분야는 아직까지도 제한적이며, 이의 응용 분야 적용은 초기 단계에 있다. 따라서 인공지능과 기계학습에 대한 높은 이해도를 가지고 있다면, 새로운 인공지능 응용 분야를 개척할 수 있을 것으로 기대한다.

4

스마트 생산



1. 스마트 생산(Smart manufacturing)

이번 장에서는 4차 산업혁명 및 스마트 생산의 기본 개념과 특징에 대해 살펴보고 전통적인 생산 방식과 어떤 차이가 있는지에 대해 다룬다.

1.1 4차 산업혁명과 스마트 생산

4차 산업혁명은 인공지능(Artificial Intelligence, AI), 사물인터넷(Internet of Things, IoT), 빅데이터 등의 첨단 정보통신기술을 통한 경제, 사회 전반의 혁신적인 변화를 의미한다. 특히 제조업에서의 4차 산업혁명은 ‘스마트 생산’으로의 이동을 의미하며 이는 제조 시스템 내에서 운영기술과 정보통신기술이 융합되어 제조 프로세스를 모니터링하는 것을 의미한다. 스마트 생산 시스템에서는 데이터를 사용하여 운영 비용을 개선하기 위한 다양한 결정을 내릴 수 있다.

미국의 국립 표준기술 연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)는 스마트 생산을 다음과 같이 정의한다.

“Fully-integrated, collaborative manufacturing systems that respond in real time to meet changing demands and conditions in the factory, in the supply network and in customer needs.” - (Source: NIST)

이는 공장, 공급망 및 고객 요구 등 제조여건 변화에 유연하게 대응하고 실시간으로 응답하는 통합된 협업 제조 시스템으로 해석할 수 있다.

스마트 생산 시스템은 IoT 디바이스와 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical Systems, CPS)의 도움으로 구현될 수 있다(그림 4-1). IoT 디바이스는 데이터를 수집하고 전달 및 처리하는 모든 장치를 의미한다. 사이버-물리 시스템은 실제 제품이 생산되는 물리 세계와 데이터를 처리하는 사이버 세계를 연결하는 개념이다(그림 4-2). 사이버-물리 시스템의 개념은 2절에서 자세히 다룰 예정이다.



그림 4-1 Smart factory (M. Ivanenko, 2019)

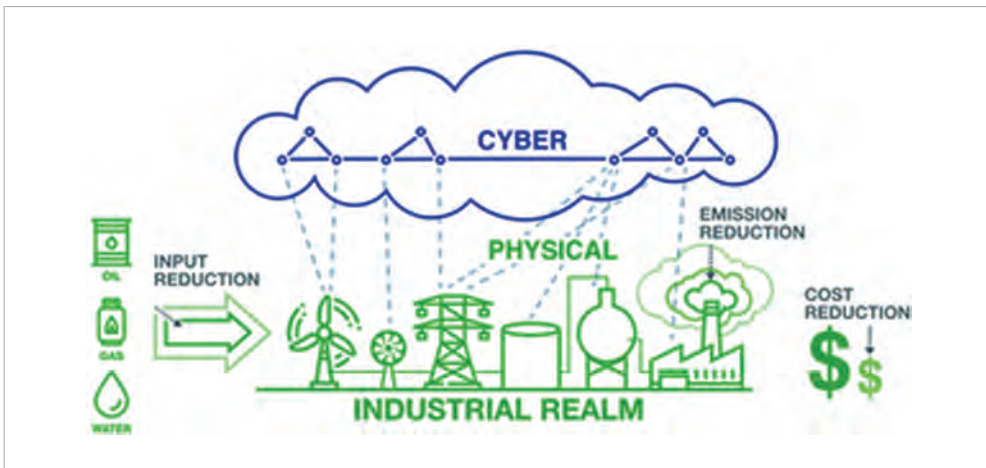


그림 4-2 Cyber-Physical Systems (O. Intervildi et al., 2020)

이처럼 스마트 생산 시스템에서는 사물인터넷을 통해 기계간 또는 기계와 사람이 통신하며 사이버-물리 시스템이 제조시스템의 프로세스를 모니터링하고 데이터를 기반으로 분산된 결정을 내린다. 스마트 생산의 개념은 제조 산업에 혁신적인 변화를 일으키고 있다.

1.2 제조 패러다임의 변화

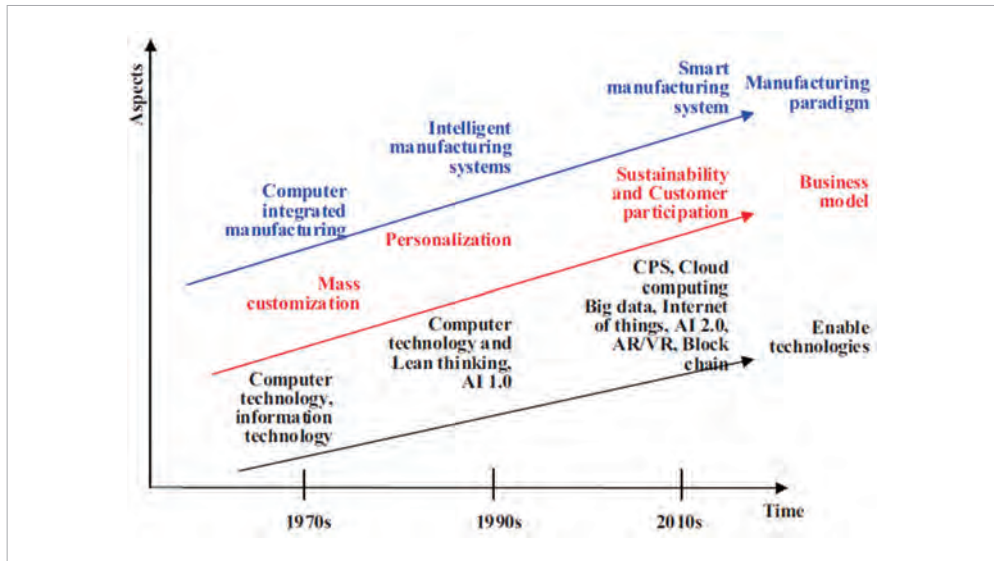


그림 4-3 The evolution of smart manufacturing systems (YJ Qu, 2019)

제조 패러다임은 컴퓨터 통합 생산에서 지능형 제조 시스템을 지나서 스마트 제조 시스템으로 발전하게 되었다(그림 4-3). 이는 첨단 정보통신기술의 발전에 따라 가능하게 되었다. 1990년대에는 컴퓨터와 정보통신 기술의 발전을 통해 인공지능이 처음 등장하게 되었다. 그 이후 사이버-물리 시스템 (Cyber-physical systems), 클라우드 컴퓨팅(Cloud computing), 빅데이터(Big data), 사물인터넷(Internet of Things), 가상 및 증강 현실(Augmented reality/Virtual reality, AR/VR), 블록체인(Blockchain) 기술 등의 발전으로 스마트 생산 시스템이 발전하게 되었다. 뿐만 아니라 비즈니스 모델에도 영향을 받았는데, 비즈니스 모델은 지난 50여년간 대량생산에서 개인화, 지속가능성, 그리고 고객의 참여로 변화하였다.

전통적인 제조방식의 공급망은 설계, 계획, 소싱, 제조, 운반 및 제공, 지원 등의 단계로 개

별적이고 선형적으로 진행된다(그림 4-4). 새로운 디지털 공급망 모델은 시스템 구성요소들이 상호 연결되어 있어 더 쉽게 통합될 수 있다. 또한 다양한 소스와 위치의 정보를 통합하여 생산 및 유통이 효율적으로 이뤄질 수 있다. 각 노드에서 네트워크 내의 다른 모든 노드와 상호 작용할 가능성이 있으므로 이전에 존재하지 않았던 영역 간의 연결성을 높일 수 있다. 통신은 다방향으로 이뤄지며 전통적인 생산 시스템에서는 연결되지 않았던 노드 간의 연결이 생성되어 효율성을 높일 수 있다.

스마트 생산방식은 전통적인 생산방식과는 달리 다양한 리소스를 사용할 수 있으며 하나의 제조방식에 고정되지 않고 상황에 따라서 변화할 수 있다. 또한 실시간 연결이 특징이며 자기조직화의 특징도 가지고 있다. 자기조직화란 시스템이 학습능력을 가지고 있어서 외부 환경에 맞도록 시스템을 스스로 구조화하는 것을 말한다. 또한 전통생산 방식은 제한된 정보를 가지고 있는 반면 스마트 생산은 빅데이터를 활용할 수 있다. 따라서 스마트 생산 시스템에서는 대용량 데이터를 활용하고 분석해 가치 있는 정보를 추출하고, 생성된 지식을 바탕으로 변화를 예측하거나 변화에 능동적으로 대응할 수 있다.

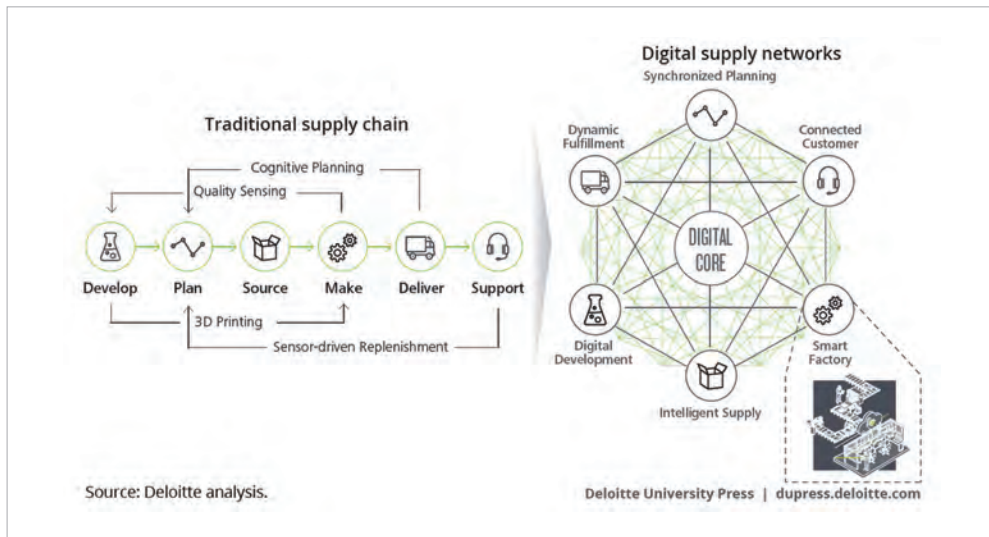


그림 4-4 Shift from traditional supply chain to digital supply network (Deloitte analysis)

1.3 스마트 생산 시스템의 적용

스마트 생산 시스템을 적용하기 위해서는 다음과 같은 네 가지의 요소가 필요하다.

- **통합**: 기계, 장치 및 사람 간의 상호 운용성이 필요하다. 상호 운용성이란 사용자가 각각의 컴퓨터를 사용하여 네트워크로 접속된 모든 시스템 자원을 자유롭게 이용할 수 있는 것을 말한다. 이를 위해 비즈니스 전반에 걸친 수직 및 수평 데이터 통합이 필요하다. 수직 데이터 통합은 제조, 조달, 공급망, 설계, 제품 수명주기 관리, 물류, 운영 및 품질과 같은 비즈니스의 모든 단계 사이에 통합을 의미한다. 수평 데이터 통합은 공급 업체, 고객 및 주요 파트너와의 통합을 의미한다.
- **분석**: 센서 및 기계에서 생성되는 정보로부터 시스템에 필요한 결정을 내리는 통찰력을 갖추는 것이 중요하다. 이를 위해 견고한 데이터 베이스 및 분석 능력이 필요하다. 통신 기술, 데이터 처리 및 분석 기술의 발전으로 효율성, 생산성 및 안정성을 증대시킬 수 있다.
- **사이버 보안**: 공장 전체의 연결은 사이버 보안 위험을 증가시킨다. 이는 지적 재산, 독점 제조 기술 및 작업자 안전을 위태롭게 할 수 있다. 따라서 시스템 전반에 걸쳐 사이버 보안 시스템을 구축하고 지속적으로 개선하는 것이 중요하다.
- **변환**: 스마트 생산 시스템을 성공적으로 도입하기 위해서는 조직 내부 문화의 변화가 필요하다. 이를 위해서 변화를 능동적으로 관리하고 필요한 기술 및 교육에 적극적인 투자가 필요하다.

1.4 스마트 생산 시스템의 장단점

스마트 생산 시스템을 도입하기 위해서는 변화가 요구되며 상당한 투자가 필요하지만 많은 장점을 가지고 있다.

첫째, 설비 효율을 향상시킬 수 있다. 데이터 분석을 통해 설비 중단 시간을 감소시키고 전환 시간을 단축시키는 등 전체 설비의 효율성을 향상시킬 수 있다.

둘째, 제품의 품질을 향상시킬 수 있다. 품질 결함을 예측하고 감지할 수 있으며, 결함의 원인을 분석함으로써 수율을 향상시키고 결함이 적은 고품질 제품 생산이 가능하다.

셋째, 비용을 절감할 수 있다. 효과적인 인력 배치와 프로세스 및 운영의 변동성이 줄어들어 프로세스 최적화가 가능하며 이를 통해 비용을 절감시킬 수 있다.

넷째, 노동 건강 및 환경 지속성 향상으로 인적 오류의 가능성이 줄어들고, 작업 만족도를 높일 수 있다.

하지만 스마트 생산 시스템에는 해킹, 바이러스 등의 사이버 위협이 존재한다. 스마트 생산 시스템에서는 모든 공정이 연결되어 있기 때문에 해킹이나 바이러스 침입은 설계 정보

유출이나 개인 정보 유출을 넘어 전체 생산 라인에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 네트워크, 클라우드, 빅데이터 보안 등 사이버 보안의 중요성을 인지하고 보안 체계를 강화해야 한다.

1.5 스마트 생산 시스템의 요소 기술

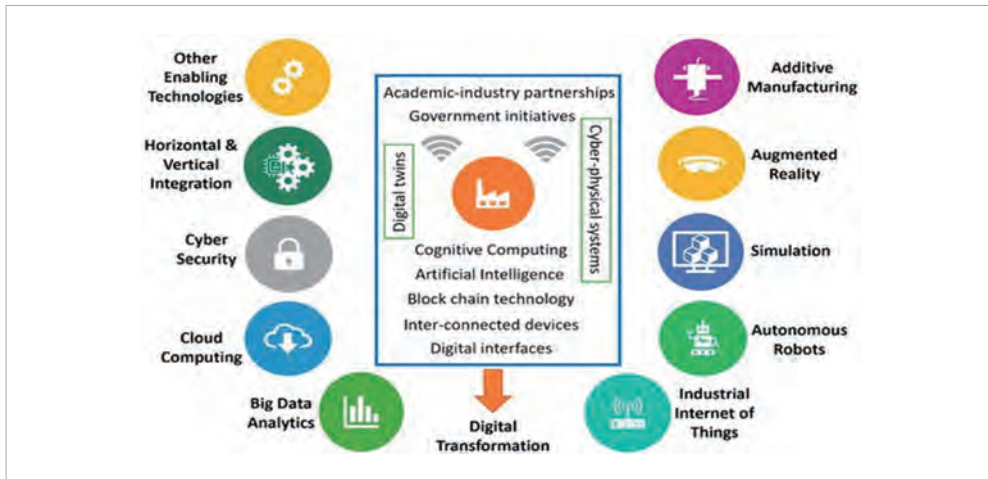


그림 4-5 Industry 4.0 technologies (J. Butt, 2020)

스마트 생산 시스템은 지능적으로 상호 연결된 환경을 사용하여 구현된다. 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 빅데이터 분석 및 인공지능과 같은 최첨단 기술은 스마트 제조의 큰 발전을 가져왔다(그림 4-5). 스마트 생산 시스템을 위한 가장 중요한 전제 조건은 사이버-물리적 통합이다. 사이버-물리 시스템 및 디지털 트윈(Digital Twin, DT)은 모두 사이버와 물리적 시스템의 통합의 수단으로 사용된다. 사이버-물리 시스템에서는 피드백 루프를 통해 물리적 프로세스와 사이버 시스템이 서로 영향을 미친다. 디지털 트윈은 제조 시스템을 더 지능적으로 변화시켜서 효율성 및 유연성을 향상시킬 수 있다. 사이버-물리 시스템과 디지털 트윈은 사이버-물리적 연결, 실시간 상호작용, 조직 통합 및 협업이라는 필수 개념은 동일하지만, 서로 다른 관점으로 사용되는 개념이다. 이는 2절과 3절에서 설명한다.

또한 프로토타이핑 용도로 개발 단계에 많이 쓰이는 적층 공정, 현실의 사물에 대해 가상의 관련 정보를 덧붙여 보여주는 증강 현실, 생산 시스템의 문제점을 미리 발견하고 수정해

공정 과정을 개선할 수 있는 시뮬레이션, 데이터 수집 및 분석 장치를 갖추고 있어 독립적으로 업무를 수행하는 자동 로봇, 사물에 센서를 부착해 실시간으로 데이터를 주고받는 기술이나 환경을 의미하는 사물인터넷, 디지털 환경에서 생성되는 대규모 데이터들을 의미하는 빅데이터, 정보처리를 자신의 컴퓨터가 아닌 인터넷으로 연결된 다른 컴퓨터로 처리하는 기술인 클라우드 컴퓨팅, 사이버 환경에서 컴퓨터와 인터넷상의 안전을 보장하는 기술인 사이버 보안, 기계, 장치 및 사람 등 비즈니스 전반에 걸친 데이터의 수평적 수직적 연결을 의미하는 시스템 통합 등이 스마트 생산 시스템의 요소 기술에 해당한다. 각각의 기술에 대해서는 4절에서 자세히 다룬다.

2. 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical System, CPS)

2.1 정의

“Cyber-Physical Systems or ‘smart’ systems are co-engineered interacting networks of physical and computational components. These systems will provide the foundation of our critical infrastructure, from the basis of emerging and future smart services, and improve our quality of life in many areas.” - (Source: NIST, Engineering Laboratory)

미국 국립 표준기술 연구소 NIST에 정의에 따르면 “사이버-물리 시스템 또는 ‘스마트’ 시스템은 물리적 구성요소와 컴퓨터 구성요소로 구성된 상호작용하는 네트워크이다. 이러한 시스템은 새로운 미래의 스마트 서비스를 기반으로 필수적인 인프라를 제공하고 여러 분야에 적용되어 삶의 질을 향상시킬 것으로 기대된다.”



그림 4-6 Cyber-physical systems (CPS)

사이버-물리 시스템은 임베디드 시스템과 물리적 환경이 결합된 것이다(그림 4-6). 임베디드 시스템은 컴퓨팅, 통신 및 제어기능(3C: compute, communicate and control)을 보유하고 있는 시스템으로, 센서와 액추에이터를 통해 물리적 세계와 상호작용한다. 오늘날 임베디드 시스템은 다양한 분야에 적용되어 사용되고 있다. 임베디드 시스템의 예로는 의료 장비, 운송 시스템, 로봇틱스 장비 등이 있다.

사이버-물리 시스템은 사이버 세계와 물리적 세계를 통합하는 시스템으로 컴퓨터 및 통신 장치에 의해 운영이 모니터링, 조정, 제어 및 통합되는 시스템을 말한다. 사이버 및 물리적 시스템은 센서 및 액추에이터로 상호작용한다. 이처럼 사이버-물리 시스템은 컴퓨팅, 통신 및 제어의 통합 및 협업을 통해 실시간 감지, 정보 피드백, 동적 제어 및 기타 서비스를 제공한다.

2.2 구조

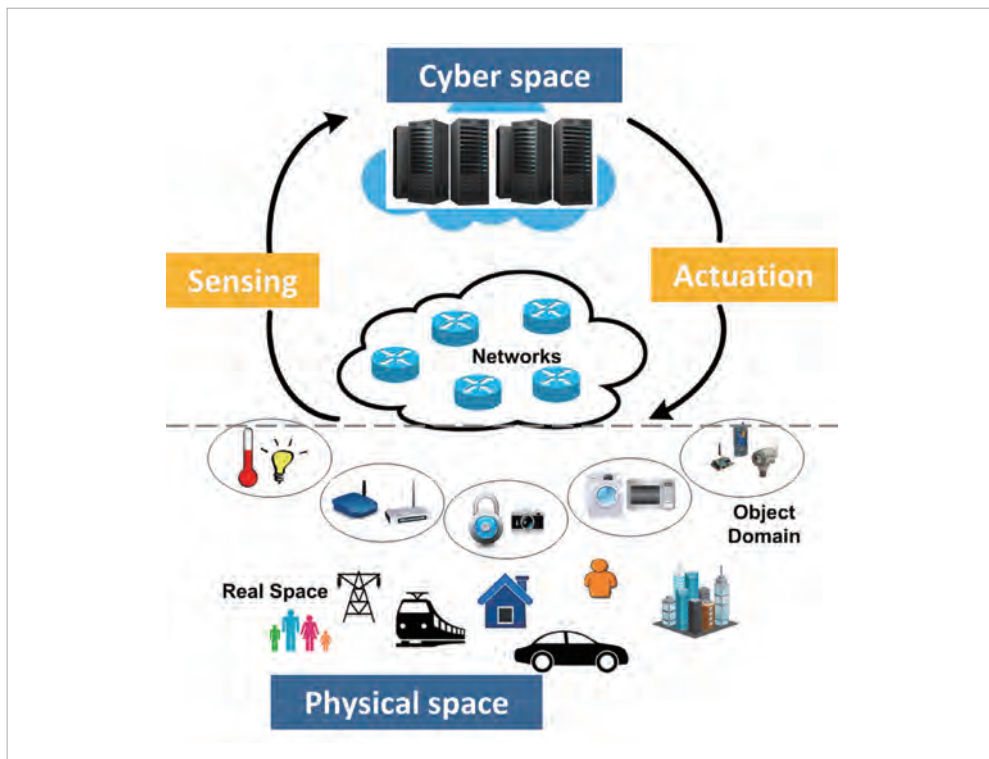


그림 4-7 Structure of Cyber-Physical Systems (Salman Ali, 2015)

사이버-물리 시스템은 사이버 공간과 물리 공간으로 구성된다(그림 4-7).

물리 공간은 사람의 자동차, 집 등이 포함되는 실제 공간과 신호를 감지하여 사이버 공간으로 보내는 객체 영역으로 구성된다. 감지 정보는 물리적 세계에서 사이버 공간으로 전송된다. 사이버 공간에서는 감지된 신호가 계산되고 분석된다. 결정된 정보는 네트워크에 의해 물리 공간으로 다시 전송되어 행동 또는 반응이 일어난다. 그에 따라 물리적 상태가 변경된다.

예를 들어, 감지된 실내 온도가 높으면 컴퓨터가 작동 신호를 보내 에어컨 설정 온도를 낮춘다. 이 과정에서 장치 간, 장치와 시스템뿐만 아니라 장치와 사람 간의 상호작용도 존재한다(그림 4-8).

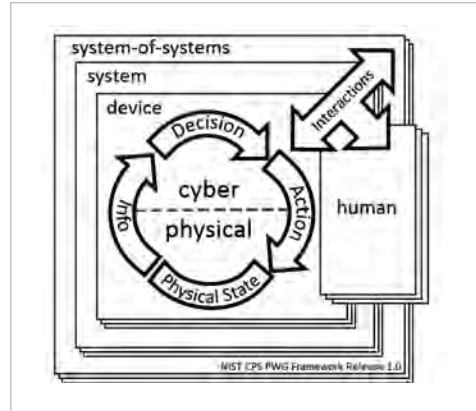


그림 4-8 Interacting elements of cyber physical systems (NIST)

2.3 구성요소

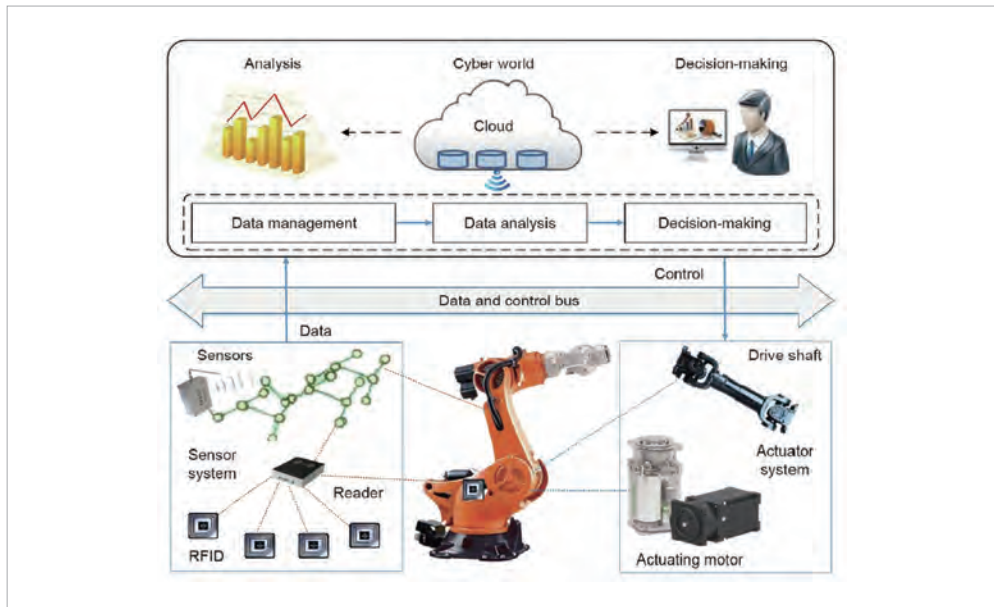


그림 4-9 Components of CPS (F. Tao, 2019)

사이버-물리 시스템은 3C(컴퓨팅, 통신 및 제어) 기술을 통합하여 물리적 프로세스에 정확한 제어, 원격 협업, 자율 관리 등의 기능을 부여한다. 사이버-물리 시스템의 핵심 요소는 센서와 액추에이터로, 물리적 기계와 환경에서 조건을 감지하고 제어 명령을 실행하는 역할을 한다. 물리적 장치와 환경에 분산된 여러 센서를 통해 재료 특성, 실시간 성능 및 환경 조건 등의 데이터가 수집되고, 이를 통해 사이버 및 물리적 세계의 상호작용이 가능하다(그림 4-9).

사이버 세계에서는 데이터 관리, 처리 및 분석을 통해 제어 명령이 생성된다. 결과는 피드백되며 액추에이터는 제어 명령에 따라 작업을 실행한다. 데이터 및 제어 입력은 실시간 통신 및 데이터 교환을 통해 가능하다. 물리적 프로세스의 (행동, 조건 또는 성능 등) 모든 변화가 사이버 세계에 변화를 일으키며 그 반대의 경우도 마찬가지이다.

2.4 특징

사이버-물리 시스템의 특징은 다음과 같다. 첫째, 계산은 상호작용으로 이뤄진다. 사이버 시스템과 물리 시스템이 지속적으로 상호작용하여 데이터를 처리하며 이를 통해 제어 명령이 생성된다. 또한 여러 프로세스가 동시에 실행되는 것이 특징이다. 그리고 피드백 루프가 장착되어 있어 센서가 환경을 감지하고 액추에이터는 환경을 변화시키며, 제어 시스템을 통해서 복잡한 업무를 처리할 수 있다. 마지막으로 데이터 교환 및 계산은 실시간으로 이뤄지며 안전을 위해서 정확한 모델링과 검증 과정을 거친다.

2.5 적용 분야



그림 4-10 Applications of CPS (Hassan, M. U., 2019)

사이버-물리 시스템은 다양한 분야에 적용된다(그림 4-10). 에너지 시스템인 스마트 그리드, 운송 시스템, 헬스케어 의료 시스템에 적용된다. 또한 산업용 사물인터넷(Industrial IoT, IIoT), 즉 스마트 생산 시스템에도 적용된다.

3. 디지털 트윈(Digital Twin, DT)

3.1 정의

앞서 살펴본 것처럼 사이버-물리 시스템은 사이버 세계와 물리적 세계를 통합하는 시스템으로 컴퓨팅, 통신 및 제어의 통합 및 협업(3C)을 통해 실시간 감지, 정보 피드백, 동적 제어 및 기타 서비스를 제공한다. 디지털 트윈은 사이버-물리적 통합과 관련된 또

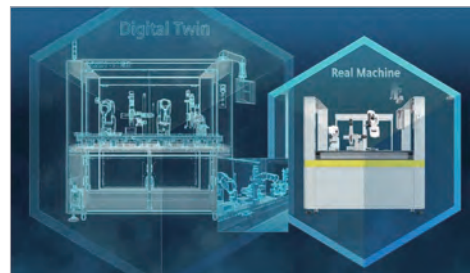


그림 4-11 Digital Twin (Siemens)

다른 개념으로 물리시스템을 가상 세계와 동기화하는 새로운 방법이다. 디지털 트윈은 현실 세계에서 행동을 시뮬레이션하고 피드백을 제공하기 위해 가상공간에서 물리적 객체의 가상 모델(트윈)을 생성한다(그림 4-11). 그리고 물리적 개체에 연결된 센서를 사용하여 물리적 장치의 데이터를 송·수신하여 가상환경에서 장비를 테스트할 수 있다.

디지털 트윈을 통해 기업은 원격에서 장비 상태를 모니터링하고 제품 설계를 최적화할 수 있다. 따라서 기업은 더 빠르고 정확하게 문제를 예측 및 감지하고 제조 프로세스를 최적화하며 더 나은 제품을 생산할 수 있다. 디지털 트윈은 제품 설계, 생산 라인 설계, 생산 공정 최적화, 예후 및 예측 유지 보수 등의 목적으로 다양한 산업 분야에서 사용된다. General Electric, Siemens, PTC, Dassault Systems 및 Tesla 등 여러 대기업에서 제품 성능, 제조 유연성 및 경쟁력을 높이기 위해 디지털 트윈 기술을 사용한다.

3.2 구성요소

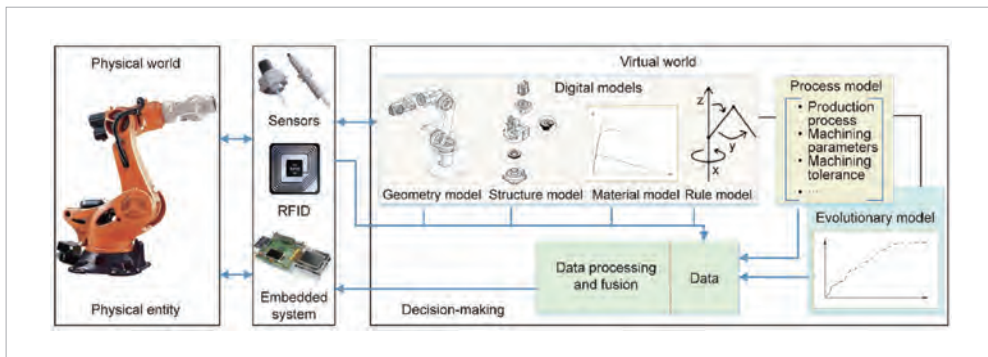


그림 4-12 Components of DT (F. Tao, 2019)

디지털 트윈의 핵심 요소는 모델과 데이터이다. 디지털 트윈 기술의 주요 아이디어는 물리적 개체에 대한 디지털 사본(가상 모델)의 모델링과 데이터 분석으로 상태 및 동작을 시뮬레이션하고 피드백을 통해 미래 상태 및 동작을 예측 및 제어하는 것이다(그림 4-12). 형상, 구조, 재료 속성, 프로세스 등을 통합하는 모델은 생산 시스템과 프로세스의 디지털화 및 시각화를 가능하게 한다. 모델은 기계 또는 시스템의 동작을 해석하고 데이터를 기반으로 미래 상태를 예측하는 데 도움이 된다. 데이터 분석을 통해 보다 정확한 예측, 합리적인 결정에 입각한 생산을 할 수 있다.

3.3 장점

디지털 트윈의 장점은 다음과 같다.

- **혁신적인 제품 디자인**: 디지털 트윈은 제품 설계의 시간과 비용을 단축해준다. 값 비싼 프로토타입을 만들 필요가 없이 가상 모델이 제조 프로세스를 대체한다. 가상 모델을 먼저 테스트하고 최적화한 후에 제품을 만들 수 있다.
- **제품 추적**: 디지털 트윈은 전체 수명주기 동안 제품을 추적할 수 있다. IoT 센서는 제품 성능에 대한 피드백을 수시로 보낸다. 디지털 트윈은 모든 데이터를 분석하고 품질을 지속적으로 향상시킨다.
- **예측 유지 보수**: 센서 데이터를 통해 제품의 상태를 모니터링하여 유지 보수를 예측할 수 있다. 제품에 서비스가 필요한 시기를 추측하는 대신 제품에 센서가 탑재되어 있어 상태를 모니터링할 수 있다. 제어 값을 클라우드로 지속적으로 전송하면 이상을 쉽고 빠르게 감지할 수 있다. 또한 사용 및 마모에 따라 유지 보수가 필요한 시기를 미리 결정할 수 있다.
- **제품에 대한 정보**: 제조업체는 제품에 대한 다양한 정보를 통해 통찰력을 가지고 정확한 예측을 할 수 있다.

3.4 적용 분야

디지털 트윈을 사용하면 운영 비용을 줄이면서 생산성 및 성능을 높일 수 있다. 디지털 트윈의 주요 응용 분야는 다음과 같다.

- **제조 시스템**: 디지털 트윈은 제품 설계 및 제조에 상당한 영향을 미친다. 제품을 직접 생산하고 공정을 직접 테스트해보는 기존 방식을 변경하며, 향후 이상을 예측하여 예측 유지 보수도 가능하다.
- **우주 연구**: 디지털 트윈은 실제로 NASA에서 사용되었는데, 우주선을 진단하고 수리하는 중요한 방법 중 하나이다. NASA는 모든 정보가 저장되는 우주선의 디지털 트윈을 만들고 운영 조건을 테스트했다.
- **자동차**: 실제 제조 전에 차량의 가상 모델을 만들도록 설계할 수 있다. 차량이 주행 중일 때도 차량의 상태를 쉽게 파악할 수 있으며 성능 및 유지 관리에 대한 피드백을 수시로 받을 수 있다.
- **풍력 발전용 터빈**: GE(General Electric)는 디지털 트윈을 사용하여 풍력 발전소의 터빈을 모니터링하고 제어한다.
- **보건 의료**: 디지털 트윈은 환자 건강 이력을 분석하여 의료 서비스를 제공할 수 있다.
- **소매**: 고객을 위한 가상 모델을 생성하고 가상에서 옷이나 액세서리를 착용해봄으로써 구매를 도와준다. 또한 매장 내 배치의 최적화나, 보안시스템 및 에너지 관리를 개선하는 데 도움이 된다.

시뮬레이션과 디지털 트윈

시뮬레이션은 제조 부문의 여러 문제점을 극복하기 위한 효과적인 방법이다. 제조 시스템은 대체로 복잡하고 비용이 많이 드는 공정이다. 새롭게 부품을 개발하는 과정에서 개발된 부품의 프로토타입을 기존의 제조 시스템에 조립하여 함께 테스트를 하면 문제가 발생할 수 있다. 또한 정상적으로 작동시키는 데 상당한 시간, 재료와 인력이 필요할 수 있다. 데이터를 분석하여 장치의 동작을 실시간으로 시뮬레이션할 수 있는 가상 모델 기반의 디지털 트윈을 이용하면 이 문제를 해결할 수 있다.

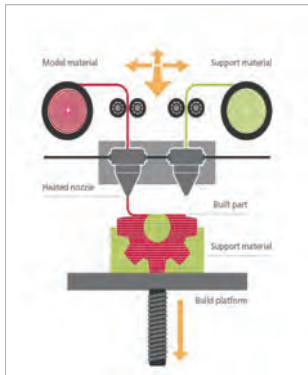
사물인터넷과 디지털 트윈

사물인터넷은 디지털 트윈과 관련된 중요한 기술이다. IoT 센서 덕분에 데이터 수집이 점점 더 용이해지고 있다. 물리적 시스템과 결합된 센서는 데이터를 수신하여 디지털 트윈 시스템으로 전송하며, 통신을 통해 제품 성능이 최적화된다. 예를 들어 기계에 센서를 장착하여 기계의 동작이나 상태와 같은 다양한 운영 데이터를 수집할 수 있다. 제조업체는 기계의 성능을 모니터링하여 생산 프로세스를 최적화할 수 있다.

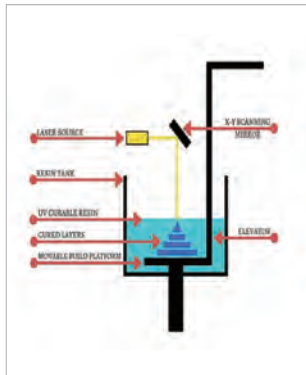
4. 요소 기술

스마트 생산 시스템을 가능하게 해주는 기술들의 개념을 다루고, 어떻게 스마트 생산 시스템에 적용되는지 알아본다.

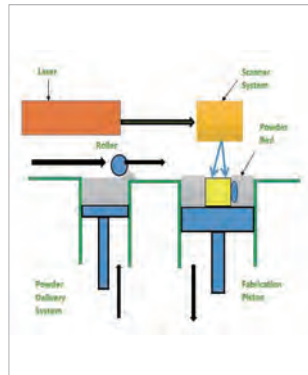
4.1 적층 제조



Fused deposition method
(rapidfab.ricoh-europe.com)



Stereolithography
(manufactur3dmag.com)



Selective laser sintering
(manufactur3dmag.com)

그림 4-13 AM processes

적층 제조(Additive Manufacturing, AM)는 3D 프린팅이라고도 불리며, CAD(Computer-aided design) 모델을 기반으로 한 레이어-바이-레이어(Layer-by-layer) 방식의 재료 증착을 통해 복잡한 3차원 형상의 부품을 생성한다. CAD 모델이 생성되면 적층 장비는 CAD 파일의 정보를 검토하고 유체, 분말 등의 연속적인 레이어를 배치하여 3D 제품을 만들 수 있다. 3D 프린팅은 프린트 헤드, 노즐 또는 기타 다양한 프린팅 기술을 사용하여 재료를 증착하여 사물을 제조한다. 이를 크게 분류해보면 노즐이나 프린터 헤드를 이용해서 재료를 적층하는 방식이 있고, 파우더나 액체가 가득 차 있는 베드에 열원이나 광원을 가해 굳혀 형상을 만드는 방식이 있다(그림 4-13). ‘Design for make’ 혹은 ‘Design for manufacturing’이라는 용어는 일반적으로 디자이너가 기존 제조 공정으로 가공할 수 있도록 설계에 제약을 가지고 제품을 디자인하는 것을 말한다. 이로 인해 새로운 제품을 만드는 개발자의 창의적인 아이디어가 구현되지 못할 수 있다. 적층 공정을 사용하면 더 다양한 3차원 형상을 만들 수 있어서 창의적인 아이디어를 구현하기 비교적 쉽다는 장점을 가지고 있다. 3D 프린팅은 다품종 소량생산에 유리하며, 시제품의 제작 비용 및 시간이 절감된다. 하지만 제작 속도가 느리고 소재의 다양성에 한계가 있다.

적층 제조 기술의 적용 분야는 다양하다(그림 4-14). 부상당한 신체 부위를 대체하기 위한 치과 및 정형외과 임플란트 프린팅에도 사용되고, 토목 및 건축 공학에서 비용 효율성과 고객 만족을 위한 구조물의 프로토타이핑 및 설계 테스트에도 활용된다. 스마트 생산 시스템에서 적층 제조 기술은 빠른 프로토타이핑을 가능하게 한다. 금형 없이 프로토타이핑을 통해 설계를 확인하고 구성 요소의 기능을 검사할 수 있으며 실제 제조 단계로 이동하기 전에 수정해야 할 사항들을 미리 확인할 수 있다. 따라서 적층 공정은 적은 비용과 빠른 시간 내에 새로운 설계를 평가하는 좋은 방법이다. 또한 다품종 소량생산 방식에 맞춰 개인 맞춤형 제품의 제작도 가능하다. 적층 제조 기술은 또한 3D 스캐닝을 통해 제품의 역설계(리버스 엔지니어링)를 용이하게 한다.

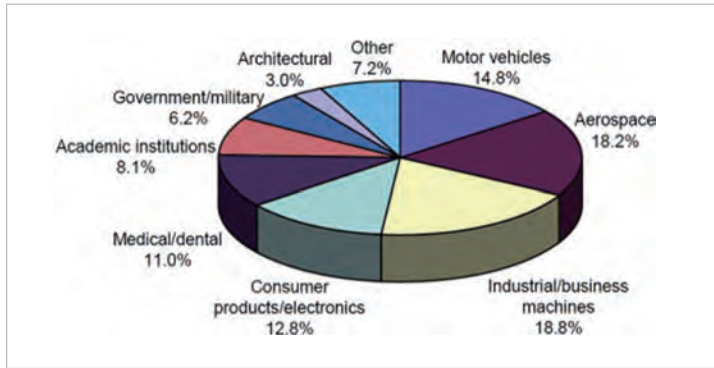


그림 4-14 Additive manufacturing applications (J. C.Najmon, 2019)

4.2 증강 현실 기술, AR

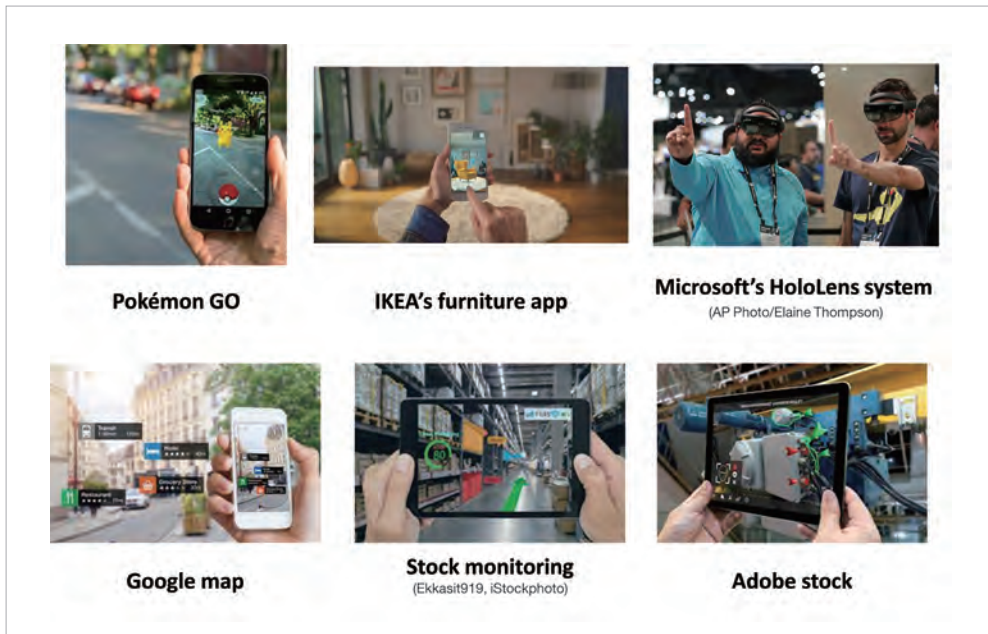


그림 4-15 AR applications

증강 현실 기술(Augmented Reality, AR)은 정보와 가상 물체를 실제 장면에 실시간으로 오버레이하는 기술을 말한다. 현실 세계의 특정 장면에서 실제로는 존재하지 않는 3차원의 가상 이미지나 정보를 겹쳐 보이게 하여 공간과 상황에 대한 유용한 정보를 제공한다. 가상의 물체는 일반적으로 3D 모델, 비디오 및 정보 형태를 가지고 있다. 현실과 가상의 결합을 통

해, 3차원 공간에 표시되는 가상의 정보와 실시간 동작 및 상호작용(인터랙티브)도 가능하다. 증강 현실 기술은 HMD(Head Mounted Display) 및 스마트폰, 태블릿 등 다양한 기기와 함께 작동한다. 장치 자체에는 물리적 개체에 디지털 디스플레이를 나타내는 소프트웨어, 센서 및 디지털 프로젝터가 포함되어 있다.

이처럼 증강 현실 기술은 기존 환경을 활용하고 정보를 추가하여 새로운 인공 환경을 만드는 기술인데 많은 개발자들이 애플리케이션을 만들어 사용자들에게 제공한다(그림 4-15). 증강 현실 기술의 가장 대표적인 예는 2016년에 출시된 “Pokémon GO” 게임으로, 플레이어는 앞에 서있는 가상 포켓몬을 가상의 포켓볼을 던져 잡을 수 있다. 오늘날 Microsoft 및 Mozilla 등의 회사와 IKEA 및 Lego와 같은 소매 업체 등 다양한 회사들이 증강 현실 기술을 사용하고 있다.

스마트 생산 시스템에서 증강 현실 기술을 사용하면 실제 제조 단계에 들어가기 전 시뮬레이션 과정을 통한 설계 검증을 거칠 수 있다. 기존 시스템에 인위적으로 추가된 구성 요소를 시각화하여 나타내고 실제 물리적 환경과 컴퓨터에서 생성된 그래픽을 결합하면 기존 환경에서 제품이 어떻게 작동하는지 검증할 수 있다. 또한 재고를 파악하고 장비의 상태를 모니터링하는 데 사용된다. 증강 현실 기술 앱을 통해 기술자와 사용자가 전문가와 실시간으로 커뮤니케이션할 수 있으며, 이를 통해 원격 지원 및 수리도 가능하다. 그 외에도 산업 전 분야에 걸쳐 신입사원의 트레이닝이나 설계 부문, 품질 보증 혹은 제조공정의 유지보수 부문, 디지털 제품 관리와 같은 운영 부문, 사용 방법이나 서비스 검사 및 검증 등의 서비스 부문, 그리고 제품 시연 및 광고와 같은 판매나 마케팅 부문에서도 널리 사용되고 있다(그림 4-16).

또한 증강 현실 교육용 앱을 통하여 새로운 방식의 교육을 할 수 있다. 이는 스마트폰처럼 간단한 하드웨어로도 사용이 가능하지만, AR 헤드셋을 이용하면 심층적인 교육이 가능하다. 예를 들어 사물의 3D 형상 보기, 확대 및 분해해보기, 내부에서 작동하는 복잡한 기계 이해 등은 증강 현실 기술을 이용하면 효과적인 학습이 가능하다. 의학 분야에서는 실습生在 증강 현실 환경에서 실습 교육을 받을 수 있도록 하며 의료 전문가가 환자와 상호작용할 수 있는 원격 의료 시스템에도 적용된다. 이처럼 증강 현실 기술은 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. 증강 현실 기술 시장은 앞으로 더욱 발전할 것으로 예상되며 Google, 삼성,

Microsoft 등 주요 IT 기업들이 주도할 것으로 예측된다.

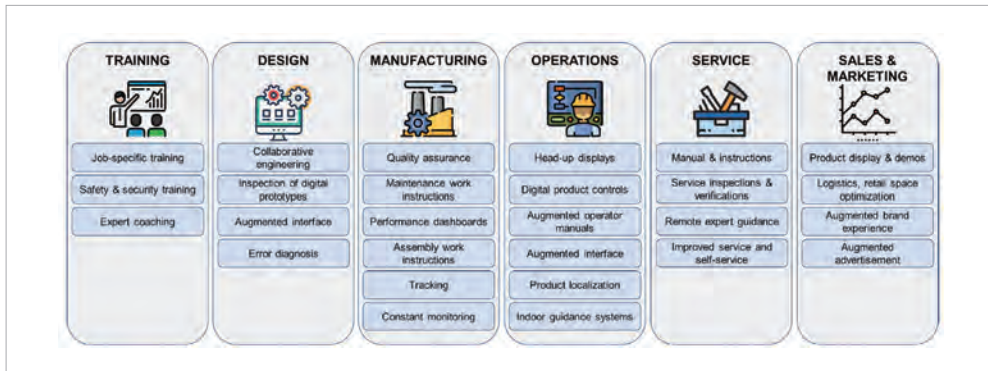


그림 4-16 Value of industrial AR across I4.0. (V. Alcácer, 2019)

4.3 시뮬레이션

시뮬레이션은 실제 세계를 미러링하는 가상 모델을 만들고, 다양한 조건들에 따른 실험을 수행한 후 이 결과를 생산계획에 활용하는 것을 의미한다. 가상 환경에서 생산 프로세스의 공정을 최적화하기 위한 시뮬레이션은 실제 생산 시스템에서의 시간과 비용을 절약할 수 있다. 시뮬레이션은 전체 생산에 필요한 설계 오류, 생산 시간, 인력 및 에너지를 분석하는 데 도움이 되며 실제 제조 프로세스로 진행하기 전에 비용 추정을 용이하게 해준다.

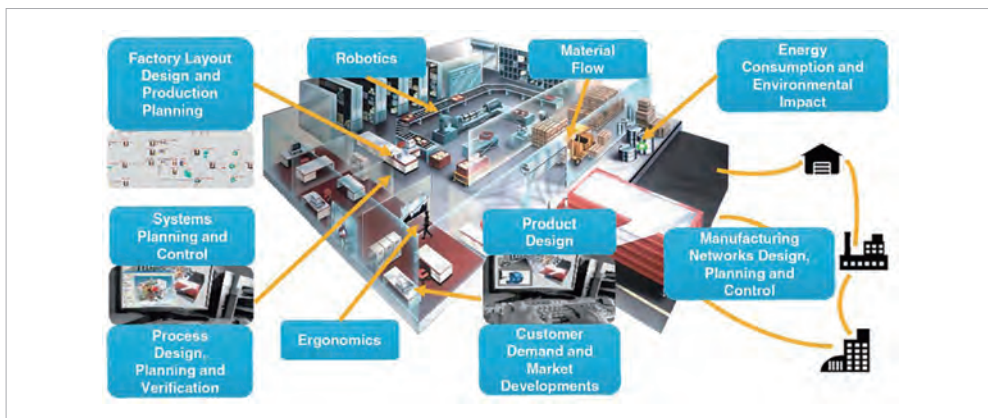


그림 4-17 Domains on simulation research of contemporary manufacturing (V. Alcácer, 2019)

제조 시스템에서는 프로세스 설계 및 검증부터 시스템 설계 및 제어, 공장 전체의 디자인 및 공정 설계까지 다양한 레벨에서 시뮬레이션이 필요하다(그림 4-17). 또한 재료의 흐름이나 제품 디자인, 그리고 에너지 소모 등의 다양한 영역에서도 시뮬레이션이 필요하다.

4.4 자동 로봇



그림 4-18 Autonomous robots (ipopba/iStock, Shutterstock)

자동 로봇은 사람의 일을 대신할 수 있도록 스스로 작업하고 생각하는 능력을 가진 기계이다. 로봇은 스마트 생산 시스템에서 필수적인 역할을 한다(그림 4-18). 특히 외부환경을 스스로 인식하고 상황을 판단하여 자율적으로 동작하는 지능형 로봇과 작업자와 작업공간을 공유하면서 사용할 수 있는 새로운 형태의 산업용 로봇인 협동(협업)로봇이 스마트 공장에 주로 사용된다. 로봇은 센서와 액추에이터, 매니퓰레이터, 말단효과장치, 제어기, 소프트웨어 등으로 구성되어 있다.

자동 로봇은 환경 조건에 따라 움직이는 로봇과 고정되어 있는 로봇으로 분류된다(그림 4-19). 또한 작동되는 환경과 동작에 따라서도 분류된다. 자동 로봇은 의료, 교육 등의 서비스에서 이용되며 건축, 채광, 농업 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

특히 제조현장에서는 제조, 검사, 유지 보수 등 생산과 출하를 위한 작업을 수행한다. 자동 로봇의 이용한 대표적인 예는 작업 현장에서 자율 이동 로봇을 사용하는 것이다. 자율 이동 로봇은 제품을 공장 현장으로 운반할 수 있다. 또한 다른 로봇이나 기계와 협력하고 실시간으로 소통하여 하차 및 픽업이 필요한 위치를 스스로 알아 낼 수 있다. 자율 이동 로봇은 실시간 생산 시스템에서 작업 신호를 받기 때문에 직원은 내부 물류의 사소한 문제가 아닌 제품 디자인이나 전체 공정 흐름 등 더 중요한 문제에 집중할 수 있다.

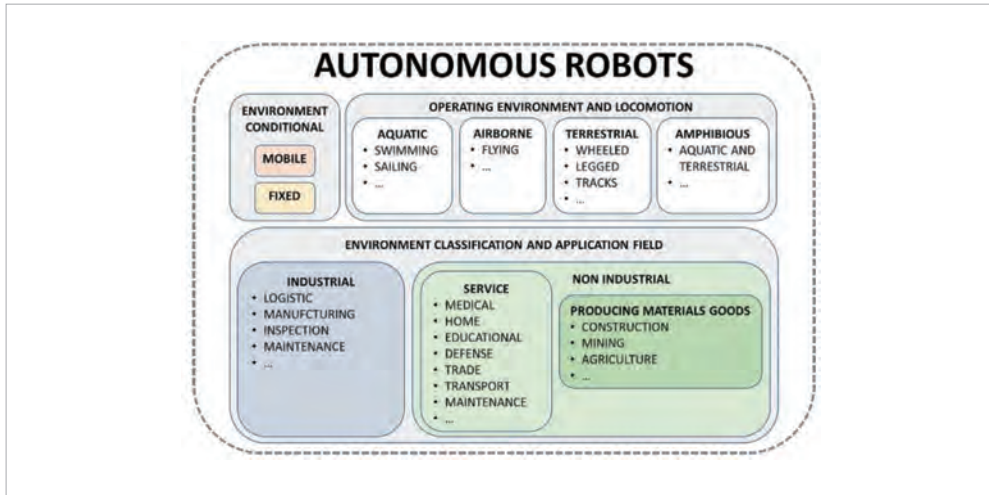


그림 4-19 Characterization scheme for autonomous robots (V. Alcácer, 2019)

4.5 IIoT

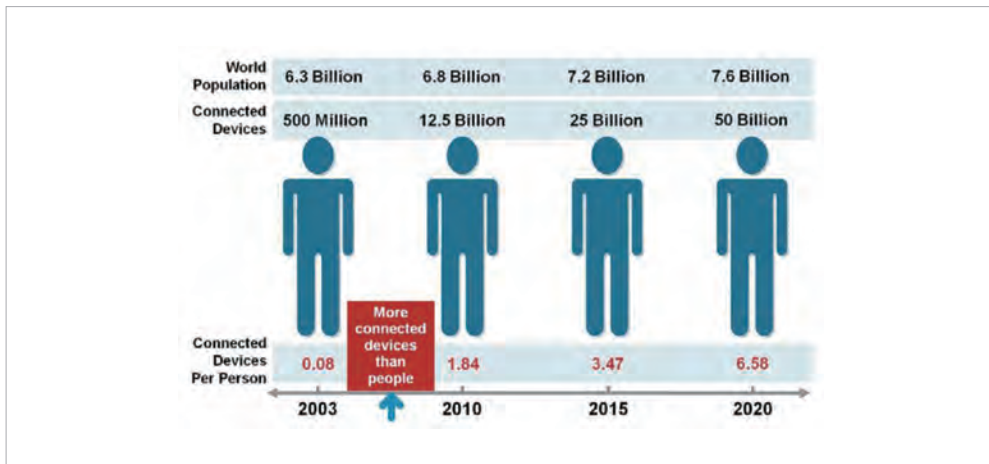


그림 4-20 Number of connected devices per person (S. Phuyal, 2020)

IIoT는 현대 사회의 인터넷의 확산과 정보통신기술의 발달로 등장하였다. IIoT는 사물들이 서로 연결된, 사물들로 구성된 인터넷을 의미하는데 객체들이 센서와 통신기능을 내장하여 인터넷에 연결되어 상호통신한다. 각 사물들이 생성한 정보를 공유, 통합하여 지능적이고 효율적인 서비스를 제공할 수 있다. 이때 인간과 인간, 인간과 사물, 사물과 사물의 연결이

모두 포함되어 궁극적으로는 모든 것이 인터넷으로 연결되는 IoE(Internet of Everything) 기반의 초연결성(Hyper connectivity) 사회로의 진입을 가능하게 해준다.

최근 센서 가격의 하락과 산업 각 분야별 IoT의 본격 도입 및 통신 환경의 발전으로 IoT 시장규모가 급속히 증가하고 있다. 사람 한 명당 연결되어 있는 디바이스의 수는 2003년에는 0.08에서 2020년에는 6.58로 증가했다(그림 4-20). IoT 기술은 개인 분야, 산업 분야, 공공 분야 전반에 걸쳐 스마트 홈, 운송, 물류, 의료, 농업 등의 다양한 분야에 적용되고 있다.

특히 IIoT는 Industrial IoT의 약자로 산업에 중점을 둔 사물인터넷, 즉 스마트 생산 시스템을 말한다. IIoT는 센서, 액추에이터, 제어 시스템, 소비자 등의 물리적 개체를 인터넷 클라우드에 연결한다. 각 개체의 상호작용과 협력을 통해 자율적으로 데이터를 연결, 수집, 분석하여 공통된 생산 목표를 효과적으로 달성할 수 있게 한다. 이는 전체 제조 프로세스 모니터링 및 제어, 생산 계획, 예측 유지 보수, 인간-기계 상호작용 개선 등을 포함한다.

4.6 빅데이터

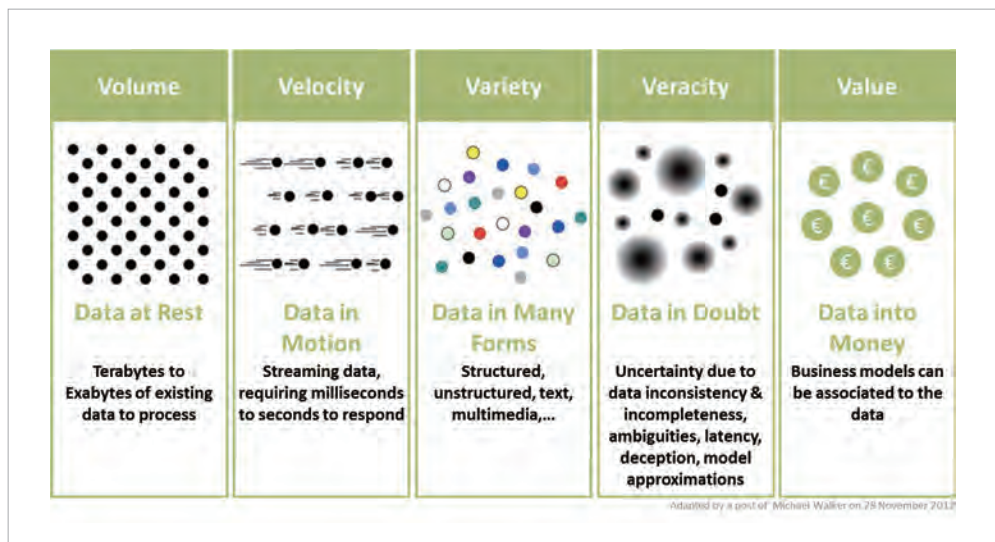


그림 4-21 5Vs in big data (Adapted by a post of Michael Walker on 28 November 2012)

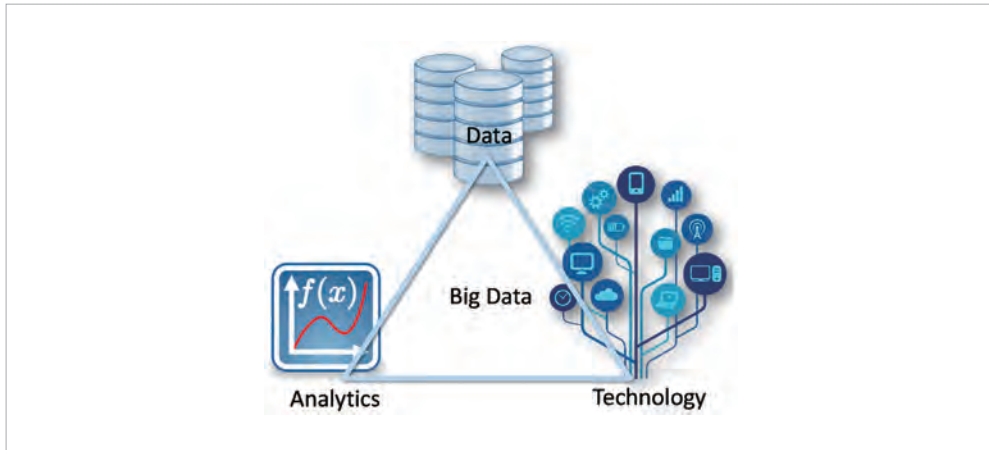


그림 4-22 The key enablers underlying the Big Data movement (M.S. Reis, 2017)

4차 산업혁명의 출현과 함께 빅데이터 기술이 매우 중요해졌다. 빅데이터는 데이터와 관련된 패턴 및 추세를 나타내기 위해 분석되는 대규모의 데이터 세트를 의미한다. 오늘날 우리는 간단한 구글 검색을 통해 거의 모든 것에 대한 데이터를 찾을 수 있으며 데이터의 양은 시간이 지남에 따라 기하급수적으로 증가하고 있다. 빅데이터는 많은 양과(volume) 속도(velocity, 데이터의 생성 및 처리 속도) 및 다양성(variety, 구조화된 데이터 뿐만 아니라 텍스트, 이메일, 오디오 등 모든 형식의 데이터) 특징과 정확성(veracity) 및 가치(value)를 특징(5V)으로 한다(그림 4-21). 여기에 가변성(variability)과 시각화(visualization)을 더해서 7V로 표현하기도 한다.

빅데이터의 활용은 통합 데이터베이스에 데이터를 저장하고 언제 어디서나 사용할 수 있도록 여러 소스에서 정보를 수집 및 분석할 수 있는 기술의 개발로 가능해졌다. 빅데이터의 핵심 원동력은 데이터, 기술 및 분석이다(그림 4-22). 빅데이터의 액세스 및 활용 방법은 데이터 추출, 데이터 저장, 데이터 정리, 데이터 수집, 데이터 분석, 시각화의 과정으로 진행된다. 고급 분석 플랫폼을 사용하여 대량의 데이터를 처리하는 데 필요한 컴퓨팅 리소스(고성능 컴퓨팅, 클라우드 서비스, 분산 및 병렬 컴퓨팅 등)를 통해 데이터를 유용한 정보로 변환할 수 있다. 이처럼 방대한 양의 데이터를 효과적이고 효율적으로 정보와 지식으로 변환하려면 새로운 분석 방법과 기술이 필요하다.

빅데이터 분석을 통해 기존 제조시스템의 효율성을 높일 수 있다. 데이터를 분석함으로써

써 더 깊은 통찰력과 높은 정밀도의 예측 결과를 얻을 수 있다. 이를 통해 제품 고장 원인 실시간 파악, 장비 고장 예측, 유지 관리를 통한 장비 가동 시간 최대화 등이 가능해진다. 예를 들어 장비 연도, 제조업체 및 모델과 같은 구조화된 데이터뿐만 아니라 수백만 개의 로그 항목, 센서 데이터, 오류 메시지 및 엔진 온도를 포함하는 구조화되지 않은 데이터들을 분석하여 문제가 발생하기 전에 유지 관리를 보다 효율적으로 할 수 있다. 따라서 부품 및 장비 가동 시간을 최대화할 수 있다. 이처럼 빅데이터 분석을 통해 제조업체는 현재 상태와 제품 고장 원인을 실시간으로 파악할 수 있다. 또한 데이터 분석을 기반으로 한 자원의 재배치로 내부 역량을 개선하고 업무 자동화 및 중복 제거가 가능해진다.

또한 빅데이터 분석은 새로운 데이터 기반 서비스를 개발하는 데 매우 유용하다. 최근 사회적인 복잡도 증가와 고객의 요구가 다양화됨에 따라 제조시스템은 고객맞춤형 생산이 가능한 구조로 전환되고 있다. 이에 직관과 경험보다는 분석에 기반하여 합리적 의사결정을 하는 빅데이터 기반 경영이 주목받고 있다. 빅데이터는 고객 요구, 피드백, 제품 요청, 시간, 비용 등 다양한 소스의 데이터를 수집하고 분석하여 스마트 생산을 위한 실시간 비즈니스 의사 결정에 도움을 준다. 빅데이터 분석을 통해 비즈니스 실패의 근본 원인을 파악하고 고객 구매 내역을 분석하여 판매 동향을 분석할 수 있다. 또한 고객의 구매 습관과 요구 사항을 이해하여 제품을 구매하도록 유도할 수 있다. 예를 들어 Netflix는 빅데이터를 사용하여 고객 수요를 예측하며 P&G는 소셜 미디어 및 초기 매장 출시의 데이터를 분석하여 신제품을 계획, 생산 및 출시한다. 빅데이터는 그 외에도 날씨 예측, 보건 의료, 소셜 미디어 분석, 공공 부문 등에 다양하게 사용되고 있다.

4.7 클라우드 컴퓨팅



그림 4-23 Cloud computing (Colin Baird, A Primer on Cloud Computing, 2019)

클라우드 컴퓨팅이란 인터넷을 통해 호스팅된 서비스를 제공하는 것과 관련된 모든 것에 대한 일반적인 용어이다. 우리가 가장 흔히 사용하는 클라우드 컴퓨팅의 예로는 클라우드 저장소인 드롭박스와 클라우드 게임 서비스인 새도우가 있다(그림 4-23). 드롭박스를 통해 우리는 하드를 따로 사지 않고 원하는 만큼 돈을 지불하여 저장 공간을 얻을 수 있다. 새도우에서는 게임을 하나씩 따로 구매하는 것이 아니라, 서비스 형태로 제공받게 된다.

기존의 온프레미스(On-premise) 환경과 비교를 통해 클라우드 컴퓨팅의 개념을 이해할 수 있다. 온프레미스는 자체적으로 보유한 서버와 로컬 저장 장치에서 소프트웨어 및 파일을 운영, 저장, 관리하는 것을 의미한다. 클라우드 컴퓨팅은 온프레미스 환경과 달리 인터넷 연결을 통해 호스트 공급자가 제공하는 서버에서 소프트웨어를 실행하고 파일을 저장할 수 있다. 따라서 서버 공간이 따로 필요 없으며, 값 비싼 컴퓨터를 구입하는 것이 아니라 사용한 서비스 또는 공간에 대해서만 비용을 지불하면 되기 때문에 경제적이다. 또한 유지 보수가 용이하고 데이터를 더 안전하게 보호 및 복구할 수 있다. 또한 용도에 따라 수정이 자유롭고 저장 용량도 추가로 구매할 수 있어 가용성이 크다. 업데이트는 자동으로 이뤄지며 팀끼리 같은 문서에 수정이 가능하여 공동 작업도 쉬워진다. 또한 저장된 데이터를 언제 어디서든 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

클라우드 컴퓨팅의 경제성과 유연성

예를 들어 고객의 수요가 가변적인 웹 사이트를 운영한다고 가정해보자. 시간에 따라, 그리고 월별로 트래픽이 다를 수 있다. 클라우드를 사용하지 않으면 피크로드가 짧은 시간 동안만 지속된다고 해도 최대 부하를 충족할 수 있는 성능의 컴퓨터를 구입해야 한다. 나머지 시간에는 대부분의 컴퓨팅 리소스가 유휴 상태로 있을 수밖에 없으며 이에 따라 시간과 비용이 낭비된다. 따라서 비효율성이 발생하게 되는데, 클라우드 컴퓨팅은 이처럼 워크로드가 가변적인 경우에도 적은 비용으로 유연하게 대응할 수 있다.

클라우드 컴퓨팅은 크게 배치 모델(deployment model)과 서비스 모델(service model)로 분류할 수 있다. 배치 모델은 공개 및 보안 정도에 따라 퍼블릭, 프라이빗, 하이브리드 클라우드로 세부 분류된다. 서비스 모델은 제공받는 범위에 따라 IaaS(Infrastructure-as-a-Service), PaaS(Platform-as-a-Service), SaaS(Software-as-a-Service)로 세부 분류된다.

클라우드 기반 솔루션은 스마트 공장에서 전체 공급 사슬의 IT 네트워크 중심축 역할을 한다. 기기 통신의 다양성과 정보의 가용성의 특징으로 공장 간 혹은 공장 내 원활한 통합을 지원하고 소비자의 요구에 대응할 수 있도록 해준다. 또한 대량의 데이터를 보관하고 처리할 수 있는 능력을 가지고 있어 제조 기업이 필요한 핵심 전산 인프라를 축소하고 제조 환경의 변화에 따라 유연하게 대응할 수 있도록 지원해준다.

클라우드 컴퓨팅은 앞서 설명한 대로 다양한 장점이 있지만, 지속적이고 안정적인 인터넷 연결이 필요하며, 매우 민감한 데이터에 대한 액세스 및 보안 문제 등이 해결해야 할 문제점으로 남아 있다.

4.8 사이버 보안

사이버 보안은 디지털 공격으로부터 시스템, 네트워크 및 프로그램을 보호하는 것을 말한다. 이러한 사이버 공격은 일반적으로 민감한 정보에 액세스, 변경 또는 파괴하는 것을 목표로 하여 사용자로부터 돈을 갈취하거나 정상적인 비즈니스 프로세스를 방해한다.

가장 일반적인 유형의 사이버 공격으로는 피싱이 있다. 피싱은 믿을만한 출처에서 보낸 이메일과 유사한 사기성 이메일을 보내는 것이다. 신용 카드 번호 및 로그인 정보와 같은 민감한 데이터를 훔치는 것을 목표로 한다. 랜섬웨어는 일종의 악성 소프트웨어이다. 몸값(랜

섬, ransom)이 지불될 때까지 파일이나 컴퓨터 시스템에 대한 액세스를 차단하여 돈을 갈취한다. 멀웨어는 무단 액세스를 얻거나 컴퓨터를 손상시키도록 설계된다.

오늘날에는 IoT 기술로 많은 장치와 사람들이 네트워크 상에 연결되어 있어, 효과적인 사이버 보안 시스템을 구현하는 것이 어렵다. 사이버 보안은 신원 등 개인 데이터 보호뿐만 아니라 병원 및 금융 회사와 같은 중요한 인프라 보호에도 필수적이다. 충분한 교육과 주의를 통해 사이버 공격을 막고 사이버 위험으로부터 개인 및 조직을 보호함으로써 우리 사회의 기능을 유지할 수 있다.

5. 마치며

스마트 생산 시스템은 제조 시스템 내에서 운영 기술과 정보통신 기술이 융합되어 제조 프로세스를 모니터링하는 시스템을 의미한다. IoT 기술 등을 통해 지능적으로 상호 연결된 환경을 구현하여 실시간으로 응답하는 통합된 협업 제조 시스템을 구축한다. 이를 통해 고객 요구 등 제조 여건 변화에 유연하게 대응하고 운영 비용을 개선할 수 있다. 스마트 생산에서 가능 중요한 전제 조건은 사이버 세계와 물리적 세계의 통합이다. 사이버-물리 시스템과 디지털 트윈이 시스템 통합의 수단으로 사용된다. 또한 적층 공정, 증강 현실, 시뮬레이션, 자동 로봇, 사물인터넷, 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅, 사이버 보안 등 최첨단 정보통신 기술을 활용하여 실현된다. 스마트 생산 시스템은 설비효율 향상, 비용 절감 등 다양한 장점을 가지고 있어 앞으로 다양한 산업 분야에 적용, 발전될 것으로 기대된다.

5

안전협동로봇



1. 개요

협동 로봇(Collaborative Robot) 혹은 코봇(Cobot)은 사람과 작업 공간을 공유하며 사람과 물리적으로 상호작용할 수 있는 로봇이다. 협동 로봇의 특징은 자동차 용접, 페인팅 로봇과 같은 대부분의 산업용 로봇이 사람과는 물리적으로 구분된 독립된 공간에서 작동하도록 설계된 점과 대조된다. 협동 로봇의 특징은 생산 시스템에서 로봇의 자유로운 활용이 가능하게 하여 최근 주목받고 있다.

사람과 상호작용을 통해 서비스를 구현하고자 하는 협동 로봇의 응용 개념은 최초의 산업용 로봇으로 인식되는 Unimate의 로봇 데모에서부터 있었다[1]. 사람과 작업 공간을 공유하며 사람과 물리적인 상호작용을 통해 로봇을 작동시키려는 시도는 노스웨스턴 대학교 교수 J. 에드워드 콜 게이트와 마이클 페쉬킨에 의해 1996년에 발명된 Cobot 시스템이 근원이다. 이들이 Cobot이라는 용어를 처음 사용하였다. 컴퓨터에 의해 제어되는 장치를 사람의 직접적이고 물리적 상호작용을 통해 동작을 수정하고 제어할 수 있도록 한 협동 로봇의 핵심 기술이 구현된 것이다. 이들이 개발한 시스템은 제너럴 모터스(General Motors)의 자동차 생산 라인에서 작업자의 작업을 돕기 위해 개발된 시스템이기 때문에 지금의 협동 로봇과는 다른 형태의 로봇이었다. 기술의 핵심은 협동 로봇이 인간 작업자와 협력하여 작업물의 방향을 전환하거나 조종하여 컴퓨터가 동작을 제어할 수 있게 하는 것이었다.

현재 인식되는 협동 로봇은 2004년 KUKA가 개발한 LBR(Leichtbauroboter) 로봇이 시초

이다. 이 로봇은 DLR(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 영어: German Aerospace Center)의 로봇 및 메카트로닉스 연구소가 1995년 개발한 LWR(Light Weight Robot)에 그 기반이 있다. 2004년 KUKA는 DLR의 LWR III 모델을 라이선싱하고 상품화를 시작했다. LWR은 로봇 자중대비 가반 하중을 1:1로 만들기 위해서 약 1:160 혹은 1:100 정도의 기어비에 회전 방향 전환 시 정확도가 높은 하모닉드라이브를 사용하고 전자기 브레이크, 파워 컨버터, 엔코더, 토크 센서가 일치화된 BLDC 모터 모듈을 개발하여 사용하였다. 정밀 제어를 하면서 외력을 감지하기 위해 모터 쪽에 incremental encoder와 출력 쪽에 absolute encoder를 동시에 사용하면서 토크 센서를 사용한 것이 특징이다[2].

한편 상업적으로 성공한 협동 로봇은 2008년부터 Universal Robots이 내놓은 UR 시리즈 로봇이 있다. 2012년 Rethink Robotics는 정교하지는 않지만 프로그래밍하기 쉽고 저렴한 Baxter를 내놓았고, 이후 2015년 UR 수준의 정밀도를 가진 Sawyer를 내놓았지만 성공적이지는 못했다. 국내에서는 두산로보틱스, 한화테크윈, 뉴로메카가 2017년 협동 로봇 시장을 개척하였다.

협동 로봇에 대한 일반적인 개념은 앞서 설명하였지만 문서에 의한 정확한 정의와 협동 로봇을 활용한 협동작업유형은 표준에 따라 다양하게 제시되고 있다. 국제표준 ISO 10218-1 안전요구 표준개념에 따르면 협동 로봇은 같은 공간에서 함께 작업하기 위한 협동 운용 조건을 충족하는 로봇으로, 사용자의 안전을 고려하기 위해 로봇이 작동하는 동안 로봇의 작업 영역에 인간이 접근하는 것을 다양한 수단을 이용하여 철저히 배제하는 것으로 정의되어 있으나, ISO/TS 15066에서는 로봇의 작업 공간 안에서 인간 작업자의 안전을 보장하는 것으로 정의되었다.

협동 로봇 시장 점유율이 가장 높은 Universal Robots에서는 ‘협동’(collaborative)이라는 단어를 간단한 사용, 간단한 통합, 감당할 수 있는 비용 및 안전으로 정의한다. 협동 로봇 시스템 분야의 안전에 대한 ISO/TS 15066은 네 가지 협동 작업 유형을 명시하고 있다.

- a) 안전 정격 감시 정지 (Safety-rated monitored stop)
- b) 핸드 가이드 (Hand-guiding operation)
- c) 속도 및 분리 모니터링 (Speed and separation monitoring)
- d) 동력 및 힘 제한 (Power and force limiting)

안전 정격 감시 정지 측면에서 보면 협동 작업 공간에서 인간 운용자가 위험에 접근하거나 노출되기 전에 로봇 시스템이 멈출 수 있어야 한다. 작업 공간 내에 인간 운용자가 없는 경우에만 로봇은 비협동 로봇으로 움직일 수 있다. 엄격하게 이 방법을 적용하면, 로봇 시스템 또는 인간 운용자가 움직이는 것이지, 동시에 둘 다 움직이지는 않게 한다. 이 방법은 로봇과 인간 작업 간 협동 작업의 이점을 활용할 수 없지만, 로봇 시스템의 드라이브 파워를 제거하지 않은 상태에서 핸드 가이드를 실시하여 손쉽고 빠르게 자동 작업을 다시 시작할 수 있다.

핸드 가이드 조작 측면에서 인간 운용자는 손으로 조작하는 장치를 사용하고 로봇 시스템은 운용자의 동작 명령에 따라 움직인다. 운용자가 로봇 시스템의 작동을 직접 제어하므로 이는 일종의 수동 제어 작동이지만, 한번 수동 작업으로 프로그래밍하면 이후 자동 작동이 가능하므로 수동 작동이 아닌 자동 작동으로 간주한다.

속도 및 분리 모니터링 측면에서 로봇은 인간 작업자와 상대적인 거리에 따라서 안전 정격 감시 정지 상태, 저속 운영 상태, 정상 운영 상태 영역으로 구분하여 작동한다. 대부분의 협동 로봇은 기본적으로 동력과 속도를 제한하도록 설계되어 있다. 속도 및 분리 모니터링 방법을 사용하기 위해 안전 스캐너와 같은 외부 안전장치를 사용해 사람이 협동 작업 공간에 접근하면 속도를 낮추는 방식으로 운영한다.

로봇이 특정한 수준의 동력 또는 힘을 감지하면 로봇 시스템을 중지해 인간 운용자를 보호한다. 동작, 속도, 힘 및 동력 모니터링을 위한 안전 기능 덕분에 인간 및 로봇 시스템이 같은 작업 공간에서 동시에 움직일 수 있다. 위험 평가가 제대로 시행되지만 한다면 기존의 안전장치와 보호장치가 필요하지 않다. 동력 및 힘 제한 방법은 인간이 움직이는 로봇 시스템과 접촉할 수 있음을 가정한다. 따라서 위험 평가 프로세스 중 인간의 신체에 미치는 영향을 고려해야 한다. 고통이나 상해를 방지하기 위해 애플리케이션이 하중과 속도를 제한한다.

협동 로봇이 인간을 감지하기 위한 추가 기술에 대한 연구 개발은 현재 진행 중이다. 예를 들어 인간과 로봇 시스템 사이의 거리를 측정하는 데 정전용량형 센서를 사용할 수 있다[3]. 안전 기능을 위한 이러한 신기술은 아직 상용화되지 않았다. 안전 감지는 검증 및 입증된 기능적 필수 안전 및 적용을 충족해야 하며, 인간을 감지하는 감지 기술이 성공적으로 개발되어 안전 정격 제품으로 인증을 받으면 안전장치를 일반 기능으로 로봇에 통합할 수 있을 것

이다.

본 교재에서는 협동 로봇의 핵심 기술인 접촉 감지 및 핸드 가이딩에 해당하는 직접 교시 기술에 대한 기초적인 내용을 다루기로 한다.

2. 접촉 및 외력 감지

협동 로봇은 인간 작업자가 협동 로봇의 끝을 잡고 움직이면 로봇의 동작을 만들어 낼 수 있고, 인간 작업자의 안전 확보를 위해 협동 로봇이 갑자기 인간 작업자와 접촉했을 때 큰 충격을 주지 않고 멈출 수 있다. 이러한 경우 로봇과 외부 환경의 접촉 순간을 알아내는 기술이 필수적이다. 충돌된 인간 작업자의 안전을 확보하기 위해서는 접촉 시 발생하는 충격을 최소화할 수 있어야 하고, 그러려면 아주 민감하게 접촉을 인식할 수 있는 기술이 필요하다.

이 기술이 어려운 이유는 너무 민감하게 접촉을 인식하게 설정하면 로봇이 움직이면서 어쩔 수 없이 겪게 되는 하중 변화, 마찰 변화, 관성력의 변화 등으로 인식 오류가 발생할 수 있기 때문이다. 아주 민감하게 작동하는 접촉 감지 기능을 구현하기 위해서는 마찰보상, 질량 관성 추정 등의 추가적인 작업이 필요하다. 본 교재에서는 이상적인 상황에서 접촉력을 감지할 수 있는 몇 가지 방법에 대해 소개한다.

2.1 로봇 동역학 모델

로봇 동작은 다음의 2차식으로 표현할 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_F = \tau_m + \tau_{ext} \quad (1)$$

여기에서 q 는 관절각, $\dot{q}$ 는 관절각속도, $\ddot{q}$ 는 관절각가속도, $M(q)$ 는 로봇의 관성질량으로 관절각에 대한 함수, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 구심가속도와 코리올리가속도와 관련된 항으로 관절각과 관절각속도에 대한 함수, $g(q)$ 는 중력항으로 관절각에 대한 함수, τ_F 는 로봇 관절에 작용하는 마찰력이다. τ_m 은 모터가 만들어내는 토크이고 τ_{ext} 는 접촉과 같은 외력이 관절에 작

용하는 힘이다. τ_{ext} 는 접촉 지점을 알고 있다면 외력과 자코비안을 적용해 직접적으로 매칭될 수 있다.

본 교재에서는 마찰력은 충분히 모델링해서 보상했다고 가정하자. 마찰력을 모델링하고 보상하는 것은 여전히 시간과 노력이 필요한 일이지만 본 교재에서는 자세히 다루지 않겠다. 또한 식을 단순하게 표현하기 위해 $n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$ 를 정의하자. 우리가 다루는 로봇의 모델을 다음 식으로 표현한다.

$$M(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau_m + \tau_{ext} \quad (2)$$

2.2 로봇 동역학 모델을 이용한 외력 계산

식 (2)로 표현되는 로봇에서 로봇의 관절각, 각속도, 각가속도뿐만 아니라 관성질량 정도 및 기타 다른 동역학 모델이 실제와 같다면 외력은 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$\tau_{ext} = M(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) - \tau_m \quad (3)$$

즉, 로봇의 관절각, 각속도, 각가속도 정보를 측정하고 이를 이용해 로봇의 움직임을 만들어낸 힘을 계산하고, 여기에서 모터가 입력한 힘을 제외하면 외부에서 로봇에 작용한 힘이 된다. 하지만 실제 상황에서 이 모델을 적용하기에는 어려움이 있다. 왜냐하면, 보통의 경우 우리는 로봇의 관절각 정보만을 엔코더를 이용하여 측정할 수 있고, 각속도나 각가속도는 관절각 정보를 한 번 또는 두 번 미분해야 얻을 수 있는데, 노이즈가 섞여 있는 신호를 두 번 미분해서 사용하는 것은 상당한 오류를 발생시키기 때문이다.

2.3 정확한 로봇 동작을 가정하고 외력 계산

로봇을 이용한 작업을 만들 경우, 로봇이 따라서 움직여야 하는 목표 관절각(q_d), 각속도($\dot{q}_d$), 각가속도($\ddot{q}_d$)를 설계한다. 이들 값은 사용자가 만든 값이기 때문에 정확하게 알고 있는 값들이다. 만일 로봇이 정확하게 이러한 목표값을 추종하고 있다면, 로봇의 움직임 정보($q, \dot{q}, \ddot{q}$)는 희망하는 목표값($q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$)로 대체될 수 있다. 수식으로는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q \approx q_d, \dot{q} \approx \dot{q}_d, \ddot{q} \approx \ddot{q}_d \quad (4)$$

이를 로봇 동역학 식에 적용하면 다음과 같이 외력을 추정할 수 있다.

$$\tau_{ext} = \hat{M}(q_d) \ddot{q}_d + \hat{n}(q_d, \dot{q}_d) - \tau_m \quad (5)$$

여기에서 $\hat{\cdot}$ 는 추정된 동역학 모델을 의미한다.

이 방법은 잘 설계된 목표 동작과 위치 제어가 아주 정확하게 이루어진 경우 비교적 잘 작동할 수 있다. 하지만 근본적인 문제가 있는데, 그것은 외력이 로봇에 작용하는 순간 (4)의 가정이 깨진다는 점이다.

2.4 외란관측기를 이용한 외력 추정

외란관측기를 이용한 방법을 이해하기 위해서는 우선 외란관측기의 원리를 이해해야 한다. 다음 그림과 같이 로봇 모델을 단순화시킬 수 있다. 모터 토크는 외력과 합쳐서 로봇에 작용하여 로봇의 움직임을 만들어 낸다. 만일 우리가 로봇의 모델을 정확하게 알 수 있다면 얻어진 속도에 로봇의 역모델을 적용하면 외력과 모터 토크가 합쳐진 값을 얻게 되고, 여기에서 알고 있는 모터 토크 값을 빼주면 외력을 얻게 된다. 이때 큰 문제는 로봇의 역모델을 알아야 한다는 것이다. 로봇의 모델을 $P(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$ 라고 하자. 로봇은 동역학적인 시스템이기 때문에 $D(s)$ 의 차수는 $N(s)$ 의 차수보다 높아야 한다. 하지만 로봇의 역모델을 계산하면 분모와 분자가 바뀌게 되어 물리적으로 의미 있는 모델이 될 수 없다. 이를 해결하기 위해 역모델($\hat{p}^{-1}$)에 저주파 필터(Q)를 붙여서 물리적 인과관계가 성립되는 역모델(p_n^{-1})을 사용한다.

이를 식으로 표현하면 $p_n^{-1} = Q \hat{p}^{-1}$ 이다.

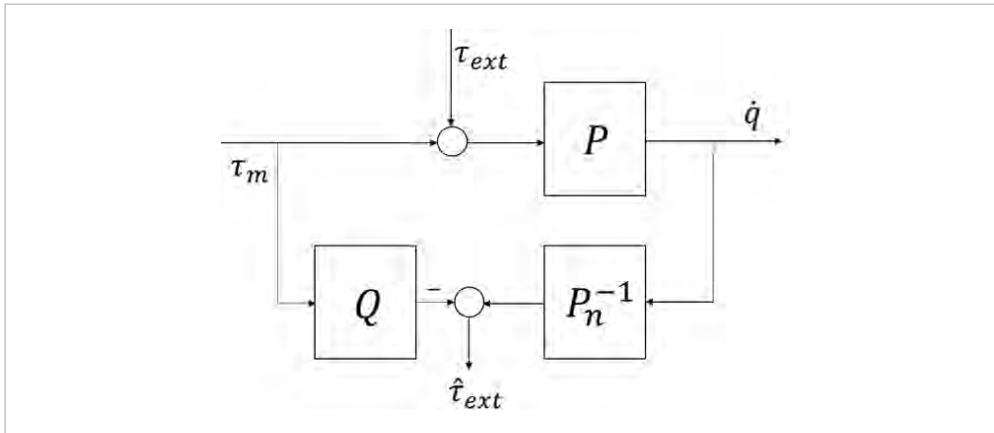


그림 5-1 Disturbance Observer

이제 접촉과 같은 외력이 작용하는 로봇을 생각해 보자. 그림 5-1에서 외력(τ_{ext})은 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{\tau}_{ext} = Q\hat{P}^{-1}P(\tau_m + \tau_{ext}) - Q\tau_m = QP^{-1}P\tau_{ext} + (QP^{-1}P - Q)\tau_m \quad (6)$$

이제 우리는 가정을 통해 식 (6)을 단순화시킬 수 있다.

로봇의 모델을 실제와 충분히 정확하게 만들 수 있다고 생각하자. 그러면 $\hat{P}^{-1}P = 1$ 이므로 식 (6)은 식 (7)과 같이 단순화된다.

$$\hat{\tau}_{ext} \approx Q(\tau_m + \tau_{ext}) - Q\tau_m \approx Q\tau_{ext} \quad (7)$$

이제 문제는 Q 를 설계하는 방법으로 바뀌었다. 로봇을 움직이는 모터 토크는 로봇이 천천히 부드럽게 움직일 때에 저주파의 성격을 갖는다고 생각할 수 있으며, 순간적으로 들어오는 접촉력 같은 외력은 고주파의 성격을 갖는다고 생각할 수 있다. 즉, Q 의 주파수 영역대를 잘 선택하면 모터 토크가 외력 추정값에 끼치는 영향은 적어져서 최종적으로 외력의 추정값은 실제 외력에 어떤 필터가 적용된 식으로 단순화될 수 있다. 이러한 내용을 상태 방정식을 이용하여 표현하면 속도관측기(velocity observer)와 잔여운동량관측기(momentum residual observer)의 개념을 알아낼 수 있다.

속도관측기의 상태 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\dot{q}} = M^{-1}(\tau_m - \hat{n} + r) \quad (8)$$

$$\dot{r} = K_o(\ddot{q} - \hat{\dot{q}}) \quad (9)$$

여기에서 r 은 외력을 관측하는 변수이며 $\hat{\cdot}$ 은 모델로부터 추정하는 값을 의미한다. 식 (8)은 로봇의 동역학 식에서 얻을 수 있으며 식 (9)는 속도관측기의 변수로 실제 가속도와 추정된 가속도의 차이에 비례하여 변화하는 것을 모델링한 것이다. 식 (8)을 식 (9)에 적용하여 적분하면 속도관측기의 방정식이 된다.

$$r(t) = K_o \left(\dot{q}(t) - \dot{q}(0) - \int_0^t \hat{M}^{-1}(q) \cdot (\tau_m - \hat{n}(q, \dot{q}) + r) ds \right) \quad (10)$$

속도관측기가 작동하는 원리는 이상적인 상태를 가정하면 알 수 있다. 즉, 식 (9)는 식 (8)을 이용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{r} &= K_o \left(\ddot{q} - \hat{M}^{-1}(\tau_m - \hat{n} + r) \right) \\ &= K_o M^{-1}(\tau_m - n(q, \dot{q}) + \tau_{ext}) - K_o \hat{M}^{-1}(\tau_m - \hat{n}(q, \dot{q}) + r) \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 로봇의 모델이 실제와 같다면 $\hat{M} = M, \hat{n} = n$ 이라고 할 수 있고, 그렇다면 속도관측기 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{r} = K_o M^{-1}(q) (\tau_{ext} - r) \quad (12)$$

즉, 속도관측기는 다음과 같이 식 (7)의 외란관측기에서 1차 필터를 사용하는 경우와 동일한 형태가 된다. (수학적으로 엄밀하게 증명하지는 않았음.)

$$r = \frac{K_o M^{-1}}{s + K_o M^{-1}} \tau_{ext} \quad (13)$$

다른 하나의 방법은 잔여운동량관측기(residual momentum observer)이다.

식 (3)으로 표현했던 로봇 동역학식을 운동량 $p(= M(q)\dot{q})$ 를 이용하여 바꿔 표현할 수 있다. 이를 위해서 새로운 변수를 다음과 같이 정의하자.

$$\beta(q, \dot{q}) := g(q) + C(q, \dot{q})\dot{q} - \dot{M}(q)\dot{q} = g(q) - C^T(q, \dot{q})\dot{q} \quad (14)$$

여기에서 $\dot{M}(q) = C(q, \dot{q}) + C^T(q, \dot{q})$ 이다.

그러면 잔여운동량관측기 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{p}} &= \tau_m - \hat{\beta}(q, \dot{q}) + r \\ \dot{r} &= K_o(\dot{p} - \dot{\hat{p}}) \end{aligned} \quad (15)$$

이를 정리하면 다음과 같은 잔여운동량관측기를 얻을 수 있다.

$$r(t) = K_o \left(p(t) - p(0) - \int_0^t (\tau_m - \hat{\beta}(q, \dot{q}) + r) ds \right) \quad (16)$$

잔여운동량관측기도 속도관측기와 마찬가지로 이상적인 상황에서는 1차 필터의 외란관측기 형태가 된다. 즉, $\hat{M} = M$, $\hat{\beta} = \beta$ 라면, 잔여운동량은 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{r} = K_o(\tau_{ext} - \tau) \quad (17)$$

잔여운동량관측기는 속도관측기와는 달리 로봇의 질량 M 과 무관하므로 각 관절별로 적용할 수 있으며 게인 K_o 가 커지면 추정값은 실제 외력값에 수렴한다.

3. 직접 교시

산업용 로봇을 현장에 적용하려면 보통 티칭 펜던트(teaching pendant)를 이용하여 로봇의 각 관절을 움직이며 필요한 동작을 만들어낸다. 하지만 이러한 작업은 수직 다관절 로봇의 기구학적인 지식이 필요하고, 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 보다 직관적으로 로봇의 작업을 만들 수 있도록 로봇의 끝을 작업자가 손으로 잡고 로봇을 직접 움직여 필요한 경로를 기록하여 되풀이하는 직접 교시(direct teaching) 방법이 개발되었다[4]. 이 방법은 로봇의 끝 부분에 장착된 힘 센서를 이용하여 작업자가 로봇을 움직이는 힘(외력)을 측정하

고, 이를 로봇의 각 관절이 움직이는 데 필요한 토크로 계산하는 방식으로 적용된다. 산업용 로봇은 보통 속도 서보 기능이 장착되어 위치 기반으로 제어되므로, 작업자가 외부에서 주는 힘을 입력으로 해서 로봇의 목표 경로를 출력으로 만들어 주는 설계 및 제어 기술이 필요하다.

협동 로봇인 LWR은 관절이 유연하며 관절 토크 제어가 가능한 시스템이다. 이 경우 위치 제어 기반의 일반 산업용 로봇과는 달리 희망하는 토크를 직접 입력하여 제어할 수 있다. 이러한 경우에는 로봇 끝에 힘 토크 센서를 장착하는 대신, 토크 서보가 걸려 있는 로봇의 끝을 잡고 위치를 바꾸면 이를 추종하는 관절 토크를 추종하는 형태로 직접 교시를 구현할 수 있다. 이 경우는 로봇의 위치를 입력으로 하고 목표 관절 토크를 출력으로 생성하는 설계 및 제어 기술이 필요하다.

작업자가 입력하는 힘을 추종할 수 있도록 속도 입력을 만들어주는 제어기는 어드미턴스(admittance) 제어기, 작업자가 입력하는 속도를 추종할 수 있도록 토크 입력을 만들어주는 제어기는 임피던스(impedance) 제어기라고 한다. 본 교재에서는 어드미턴스를 이용한 직접 교시 방법과 임피던스를 이용하는 방법에 대해 간단히 살펴본다.

3.1 어드미턴스를 이용한 직접 교시

식 (3)에서 소개한 로봇 동역학 모델은 관절에 작동하는 토크를 입력으로 하여 움직이는 로봇을 나타낸다. 하지만 산업용 로봇의 경우 속도 위치/속도 서보 제어를 통해 작동한다. 이러한 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau_s = K_t \left[K_v \{ K_p (q_d - q) - \dot{q} \} \right] \quad (18)$$

이 식에서 τ_s 는 서보 제어기가 만들어내 로봇의 입력으로 사용되는 토크이다. 산업용 로봇의 경우 사용자는 주어진 서보 제어기의 게인만 바꿔서 사용하는 경우가 많으므로, 로봇을 작동하기 위해서는 q_d 목표 각도만 만들어서 제어기 입력으로 주면 된다.

인간 작업자가 로봇 끝에 장착된 힘 센서를 이용하여 움직이는 경우를 고려하자. 이때에 측정된 힘(f)은 자코비안(J)을 이용하여 다음과 같이 로봇을 작동하는 관절 토크로 매핑할 수 있다.

$$\tau_h = J^T f \quad (19)$$

식 (19)가 의미하는 바는 사람이 로봇의 끝을 잡고 f 의 힘으로 로봇을 움직인다면, 로봇의 관절 토크는 τ_h 가 되어야 한다는 의미이다. 즉, 이상적으로는 $\tau_s = \tau_h$ 가 된다.

어드미턴스를 이용한 직접 교시에서 할 일은 식 (19)로 표현되는 관절 토크를 입력하여 서보 제어가 필요로 하는 목표 관절각을 설계하는 것이다. 이는 식 (18)의 우측식에서 관절각 토크를 입력으로 하는 다음과 같은 관계를 찾을 수 있다.

$$q_d = K_p^{-1} K_v^{-1} K_t^{-1} \tau_s = Y \tau_s \quad (20)$$

이 식은 τ_m 을 입력으로 하여 게인 Y 를 설계하여 q_d 를 얻는 아주 단순한 형식의 어드미턴스 제어기이다. 이 단순한 경우의 Y 는 탄성(compliance)으로 볼 수 있다.

3.2 임피던스를 이용한 직접 교시

임피던스 제어는 로봇이 환경과 상호작용하는 경우에 유용하게 사용되기 때문에 보다 자세히 알아보도록 하자.

논의를 간단히 하기 위해서 1자유도 질점의 운동을 생각하자.

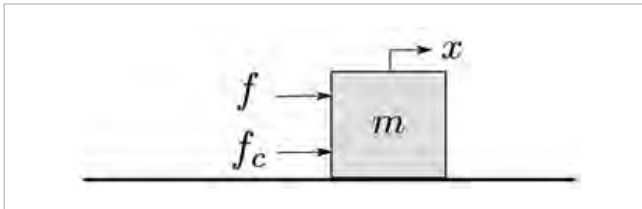


그림 5-2 접촉력과 제어력이 작용하는 질점

그림에서 질량 m 의 질점이 접촉력 f_c 와 제어력 f 에 의해 운동을 하고 있다. 이를 운동 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = f + f_c \quad (21)$$

우리의 목표는 제어력 f 를 이용하여 질점이 원하는 방식으로 운동하게 만드는 것이다. 임피던스 제어의 경우 접촉력에 의해 질점이 마치 스프링-댐퍼에 연결된 것처럼 운동하게 만

드는 것이 목표이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m_d (\ddot{x} - \ddot{x}_d) + k_d (\dot{x} - \dot{x}_d) + k_p (x - x_d) = f_c \quad (22)$$

이식에서 m_d, k_d, k_p 는 각각 m 이 f_c 의 작용으로 인해 생기는 목표 질량, 목표 댐핑, 목표 강성, $\ddot{x}_d, \dot{x}_d, x_d$ 는 각각 목표 가속도, 속도, 위치이다.

식 (21)의 운동 방정식에서 제어력 f 를 설계하여 식 (22)로 표현되는 거동을 얻으려면, 우리는 다음과 같이 제어력 f 를 선택하면 된다.

$$f = \frac{m}{m_d} (m_d \ddot{x}_d + k_d (\dot{x}_d - \dot{x}) + k_p (x_d - x)) + \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) f_c \quad (23)$$

식 (22)로 표현되는 2차 시스템은 $k_d^2 < 4k_p m_d$ 를 만족하는 경우 고유진동주파수(natural frequency)와 감쇠비(damping ratio)는 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p}{m_d}}, \zeta = \frac{k_d}{2\sqrt{k_p m_d}} \quad (24)$$

식 (23)에서 목표 질량이 실제 질량과 같은 경우를 생각해 보자. 이때에는 접촉력의 영향이 없어지고 목표 위치가 일정할 경우($\dot{x}_d = \text{constant}$) 제어력은 단순히 PD 제어가 된다.

2절에서 우리는 외력을 관측하는 방법에 대해 논의했다. 식 (16)의 잔여운동량관측기를 이용하면 작업자가 로봇을 잡고 움직일 때 동작을 의도하는 토크를 얻어낼 수 있다. 즉, 로봇을 토크로 제어하는 방법이 가능할 경우, 잔여운동량관측기를 이용하여 작업자의 의도를 반영한 외력을 이용하여 로봇이 마치 스프링-댐퍼에 연결된 것처럼 동작을 만들어 낼 수 있다.

우선 로봇 기구학에서 로봇 끝점의 속도와 관절각의 각속도는 접촉점에 대한 자코비안으로 연결된다는 것을 알 수 있다. 또한 가속도와 관절각 각가속도를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = J\dot{q}, \ddot{x} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q} \quad (25)$$

일반적으로 접촉점에 대한 자코비안은 역행렬이 존재하지 않을 수 있으므로 각가속도를 위치에 대해 풀면 다음과 같다.

$$\ddot{q} = J^\#(\ddot{x} - \dot{J}\dot{q}) + P\ddot{q}_0 \quad (26)$$

여기에서 $JJ^\# = I$, $JP = 0$, $\ddot{q}_0$ 는 임의의 벡터이다.
다음의 로봇 동력학을 생각하자.

$$M(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau_m + \tau_h = \tau_m + J^T f \quad (27)$$

여기에서 주목할 것은 식 (19)의 관계가 사용된 것이다.

작업자가 로봇을 잡고 움직이는 접촉력 f 에 의해 로봇의 엔드이팩터는 마치 질량-스프링-댐퍼처럼 움직이게 만들고 싶은 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + K_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_p(x - x_d) = f \quad (28)$$

여기에서 M_d, K_d, K_p 는 각각 목표 관성질량행렬, 댐핑행렬, 강성행렬이고 x_d 는 작업자가 잡고 있는 로봇의 엔드이팩터의 이동 경로이다.

식 (28)을 만들기 위해 식 (27)에서 τ_m 을 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$\tau_m = MJ^\#M_d^{-1}(M_d\ddot{x}_d + K_d\dot{e} + K_p e - M_d\dot{J}\dot{q} + f) + MP\ddot{q}_0 + n - J^T f \quad (29)$$

여기에서 $J^\#$ 는 pseudo-inverse, $e = x_d - x$, $P = I - J^\#J$, $\ddot{q}_0$ 는 임의의 각가속도 값이다.

이 경우도 이전과 마찬가지로 목표 관성질량을 실제 로봇의 관성질량(natural Cartesian inertia)과 동일하게 선택한다면, 즉 $M_d = (JM^{-1}J^T)^{-1}$ 이라면 식 (29)에서 외력에 의한 영향은 없어진다.

- 01** 식 (16)의 residual observer를 유도하라.
- 02** 식 (29)를 식 (27)에 적용하면 식 (28)을 얻을 수 있음을 증명하라.
- 03** 중력장에 위치한 2DOF 로봇 모델을 구성하고 residual observer를 이용하여 충돌 감지 시뮬레이션을 수행하라.

참고문헌

- [1] Robots in Film and Television, “Unimate Robot TV Intro”, [accessed on 2021. 08. 21] <https://youtu.be/ntMAz94SnVY>
- [2] LWR III, [accessed on 2021. 08. 21] https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732_read-49777/
- [3] HAN, Hyo Seung, et al. A highly sensitive dual mode tactile and proximity sensor using carbon microcoils for robotic applications. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016. p. 97-102.
- [4] Kushida, Daisuke, Masatoshi Nakamura, Satoru Goto, and Nobuhiro Kyura. «Human direct teaching of industrial articulated robot arms based on force-free control.» Artificial Life and Robotics 5, no. 1 (2001): 26-32.
- [5] Magrini, Emanuele, Fabrizio Flacco, and Alessandro De Luca. «Control of generalized contact motion and force in physical human-robot interaction.» In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), pp. 2298-2304. IEEE, 2015.

6

로봇 그립퍼와 파지 조작 기술



1. 개요

기존의 산업용 로봇은 자동차 프레임 스폿 용접, 페인팅과 같이 로봇 엔드이펙터 툴이 필요한 공간에 정확하게 위치하며 이동하는 작업에 활용되었다. 로봇 기술이 발전함에 따라 디버링과 같이 로봇의 엔드이펙터가 물체와 직접 접촉하는 방식의 작업에도 응용되고 있다. 하지만 보다 궁극적인 로봇의 활용은 로봇이 물건을 잡아 들고 원하는 곳에 위치시키고 여러 파트를 조립할 수 있는 기술이 발전하면 가능해질 것이다. 이러한 노력은 로봇 그립퍼, 파지 조작 기술의 발전을 가져왔다.

로봇이 물체를 잡아 들고 조작하기 위해서는 우선 사람의 손과 같은 기능을 하는 그립퍼 혹은 로봇손이 필요하다. 물건을 잡아 들어 옮기는 용도로 산업에서 현재 가장 많이 활용되는 엔드이펙터는 사실 공압 그립퍼이다. 공압 그립퍼는 그립퍼 면적의 평면이 있는 물체라면 가장 쉽게 로봇에 장착되어 물건을 잡아 들어 옮길 수 있다.

손가락 형태를 갖는 가장 단순한 형태의 로봇 그립퍼는 두 개의 평행한 손가락이 마주 보며 상호 거리를 조정하며, 손가락 사이로 물건을 파지하는 패럴렐조 그립퍼(parallel jaw gripper)의 형상이다. 이런 그립퍼가 파지하는 원리는 사람 손이 엄지와 검지의 손가락 두 개로 물건을 잡아드는 핀치(pinch)의 원리와 비슷하다. 손가락 표면을 말랑하게 만들면 손가락 두 개의 로봇 그립퍼를 이용하여 작은 물체를 안정적으로 파지할 수 있다.

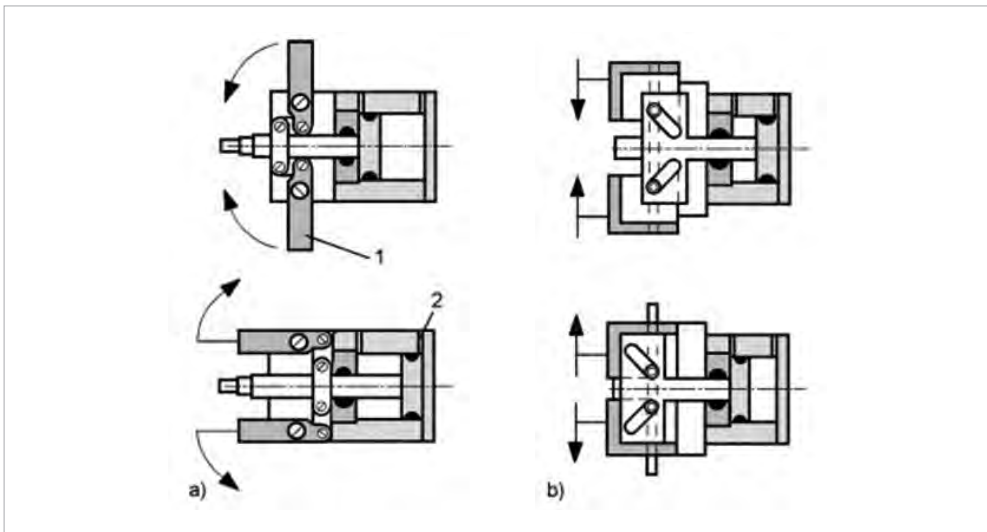
사람은 무거운 물건을 잡을 때에는 손바닥과 손가락 전체로 물건을 감아 쥐는다. 이러한 파

지를 파워그랩(power grasp)이라고 한다. 패럴렐조 그리퍼의 경우 파워그랩을 할 수 없어 원통형이나 구형의 물건을 파지하는 데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 세 개의 손가락으로 핀치와 파워그랩이 모두 가능한 바렛 핸드(BarrettHand) [2] 형태의 그리퍼가 제안되었다. 이러한 로봇 그리퍼는 굉장히 다양한 형태의 물건을 파지할 수 있으나 양손으로 물건을 파지한 상태에서 두 물건을 끼운다든지 하는 조작 작업을 하기는 쉽지 않다.

단지 사람의 손 기능을 좀 더 비슷하게 구현하기 위해 인간형 로봇손을 개발하고 파지 작업을 제어하는 시도는 굉장히 오래전부터 있어서, 로봇손은 그 형태와 기능에 따라 너무 많은 종류가 있기 때문에 본 교재에서는 가장 기본적인 패럴렐조 그리퍼의 설계 시 고려할 점을 간단히 논의하고 파지의 기본 원리에 대해 알아보도록 한다.

2. 산업용 로봇 그리퍼

패럴렐조 그리퍼로 대표되는 2지 그리퍼는 하나 혹은 두 개의 구동기로 작동시켜 두 손가락 사이의 거리를 좁혀 손가락 사이의 물체를 파지한다. 두 개의 손가락을 구동시키는 방식에 사용되는 구동기의 숫자, 구동기 형식에 따라 다양한 기구가 활용된다. 몇 가지 예를 들면 그림 6-1과 같다.



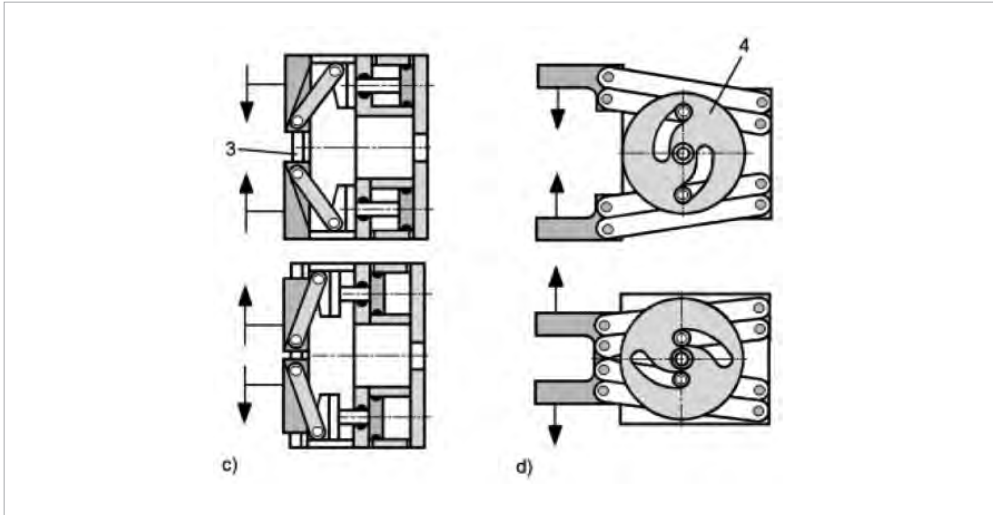


그림 6-1 Gripper 기구 및 구동기의 예 [1]

그림 6-1에서 (a)는 손가락이 힌지를 중심으로 회전하면서 작동하는 방식이다. (b)는 손가락이 슬라이더-슬롯 핀 메커니즘의 수직 방향 슬라이더에 붙어 있고 슬롯 핀은 뒤쪽의 공압을 이용한 슬라이더의 인풋으로 작동하는 기구이다. (c)는 손가락에 가이드가 있어 슬라이드-크랭크로 작동되는 형태이다. (d)는 회전하는 4번의 캠을 입력으로 4절 기구의 커넥터에 평행한 손가락이 붙어 있어 작동되는 기구이다. 모든 예는 1자유도이며 (d)를 제외하고는 공압 실린더의 선형 동작을 입력으로 받는다. 이들 그리퍼의 좌표 원점은 그리퍼가 로봇에 장착되는 위치와 물건을 파지하는 손가락 중간으로 선택한다. 특히 손가락 중간을 TCP(Tool Center Point)라 하고 로봇팔의 작업 공간 기준점으로 삼는다.

이러한 2지 그리퍼 혹은 단순 확장한 3지 그리퍼의 경우, 파지 물체의 형상에 따라 그리퍼와 물체의 접촉점을 잘 설계할 필요가 있다. 예를 들어 원통형의 물체를 파지한다고 가정하자. 패럴렐조 그리퍼와 같은 2지 그리퍼의 경우 원통을 손가락 가운데 두고 양쪽에서 밀어 잡게 된다. 손가락 표면과 물체가 모두 강체라면 로봇 그리퍼와 물체는 2점의 접점만 생성한다. 마찰이 작을 경우 파지가 어려울 수 있으며, 무엇보다도 접촉면에 수평한 방향으로의 외력이 작용하면 파지에 실패할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한 개의 손가락 표면에서 2개 혹은 그 이상의 접촉점이 발생하도록 설계하기도 한다. 접촉점에서 마찰력을 고려한 파지 해석에 대한 상세한 내용은 다음 절에서 다룬다.

	single point contact	two point contact	multi-point contact
1 finger gripper			
2 finger gripper			
3 finger gripper			

그림 6-2 그리퍼 손가락 수, 손가락 형상과 접촉점 수 [1]

산업용 그리퍼는 그리퍼의 동작 특성상 패럴렐조 그리퍼와 같이 핀치 파지를 하는 (a) 임팩티브 그리퍼(impactive gripper), 의료용 섬유 혹은 탄소 섬유 제품을 다루기 위한 (b) 인그레시브 그리퍼(ingressive gripper), 공압 그리퍼와 같은 (c) 에스트릭티브 그리퍼(astrictive gripper), 그리고 열화학적 방법으로 표면의 흡착력을 이용하는 (d) 콘티구티브 그리퍼(contigutive gripper)로 구분한다. 본 교재에서는 (a), (b), (c)에 대해 간단히 논의한다.

2.1 임팩티브 그리퍼(Impactive gripper)

임팩티브 그리퍼는 두 손가락을 기구로 연결된 구동기가 작동시켜 사이의 물체를 물리적인 힘을 이용해 파지하는 시스템이다. 그리퍼의 닫힘 운동 종류에 따라 (a) 평행 동작, (b) 회전 동작, (c) 평면에서 일반적인 동작을 하는 그리퍼로 구분할 수 있다. 각 동작에 따라 입력 모션 대비 출력 모션(기계전달함수), 그리고 입력 힘 대비 파지력 비(기계이득: mechanical advantage, 트랜스미션비: transmission ratio)가 달라진다. 로봇 그리퍼를 설계할 때 그리퍼의 동작과 위치에 따른 기계이득을 아는 것은 중요하다.

다음 그림과 같이 랙앤피니언으로 구동되는 패럴렐조 그리퍼는 $\frac{r_A}{r_G}$ 가 일정하기 때문에 기계이득은 입력의 위치(S_A)와 상관없이 일정하고 출력측의 그리퍼 위치도 입력값에 비례하여 변한다.

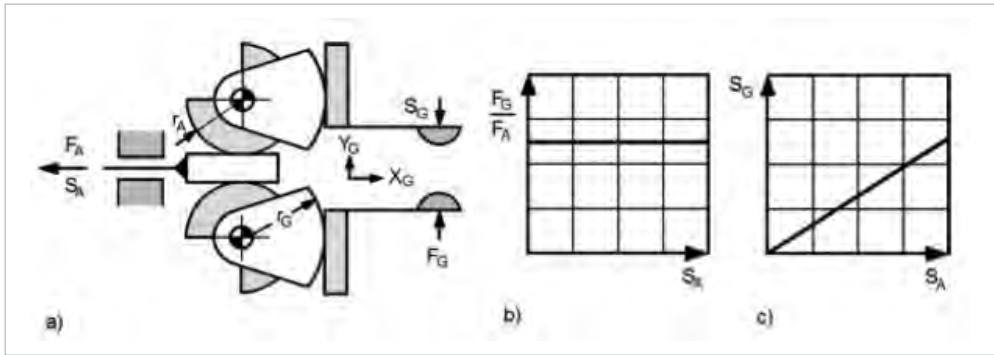


그림 6-3 랙앤피니언 구동 [1]

손가락이 회전축을 기준으로 회전하면서 가위의 형태로 잡는 형태의 그리퍼는 다음 그림과 같이 손가락 간의 거리가 멀 때에는 기계이득이 작다가, 손가락 사이 간격이 좁아지면서 급격하게 증가하는 비선형 특성을 보인다.

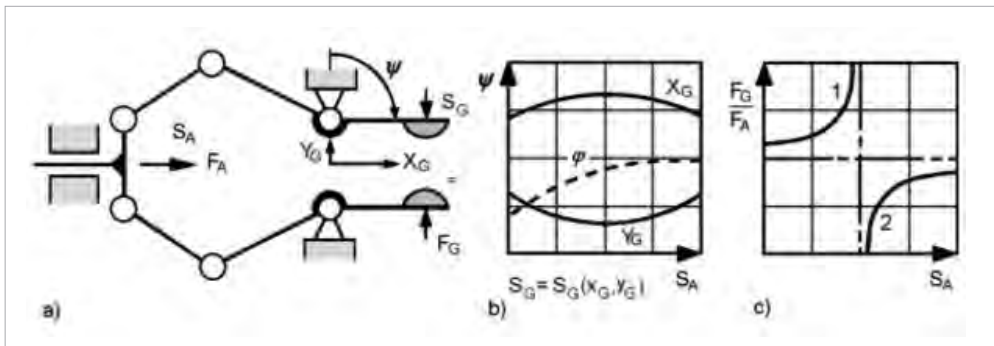


그림 6-4 슬라이더 크랭크 구동 [1]

역와트체인(Inverted Watt Chain)을 이용한 그리퍼의 경우, 그리퍼는 일반적인 평행 모션을 보이고 손가락 간격이 좁아지면서 기계이득이 작아지는 특성을 보인다.

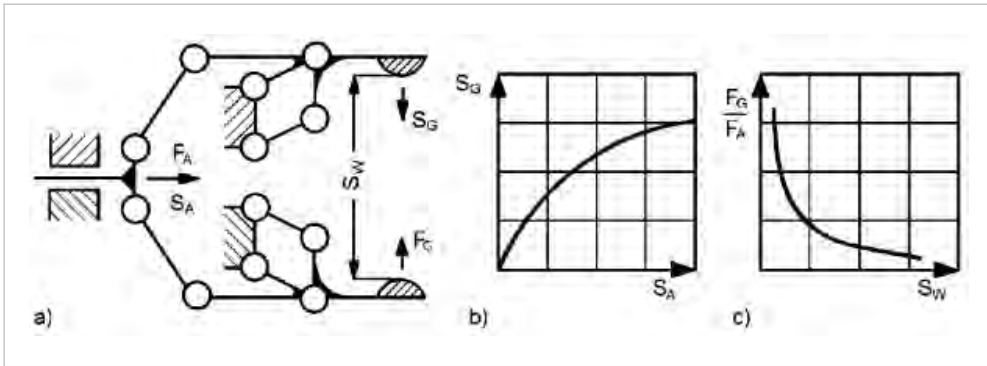


그림 6-5 역와트체인 구동 [1]

2.2 인그레시브 그리퍼(Ingressive Gripper)

섬유 자동화 공정에서 다루는 많은 물체는 강체가 아닐 수 있다. 여러 겹의 섬유 원단을 잡아 옮기는 작업에서 임팩티브 그리퍼를 사용하면 작업이 어려워진다. 이런 경우 핀과 같이 원단에 해를 주지 않으면서 살짝 뚫고 잡을 수 있는 그리퍼를 사용하기도 한다. 섬유 원단을 잡는 인그레시브 그리퍼의 작동 원리는 다음과 같다.

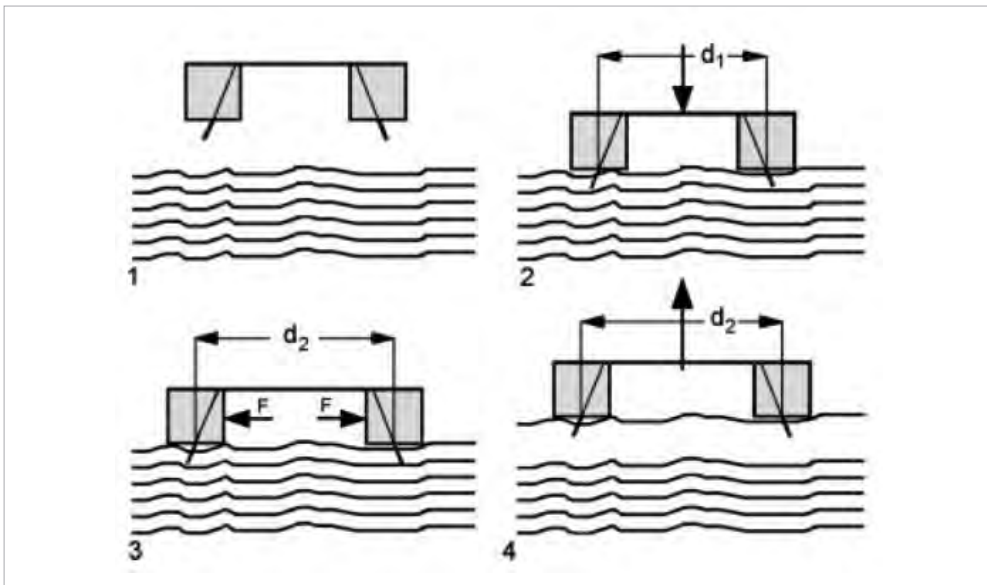


그림 6-6 인그레시브 그리퍼 [1]

겹겹이 쌓여 있는 원단에 그리퍼가 접근한다. 그리퍼는 원단과 접촉하면서 사선으로 위치된 핀이 원단 한 겹을 뚫고 들어갈 수 있게 한다. 그리퍼 간 간격을 살짝 넓히는 방향으로 힘을 주면 섬유를 파고들어난 핀은 섬유를 길이 방향으로 살짝 늘려 잡을 수 있게 되고 한 겹씩 떼어 옮길 수 있게 된다. 로봇을 이용하여 작업할 때에는 핀이 섬유에 들어가는 깊이를 적당히 제어해야 한다. 또한 섬유의 종류에 따라 그리퍼의 형상과 그리퍼에 작용하는 힘을 달리해야 한다.

2.3 애스트릭티브 그리퍼(Astrictive gripper)

손가락과 같이 눌러 잡는 힘을 적용하는 것이 아니라 연속적인 표면 힘을 이용하여 파지하는 방식이다. 진공의 힘을 이용하는 공압 그리퍼, 자기부착(magneto adhesion) 및 전기부착(electro adhesion)을 이용하는 방법이 여기에 속한다. 본 교재에서는 공압 그리퍼 기초에 대해 논의한다.

공압 그리퍼는 진공 석션(vacuum suction)을 이용하여 보통 대기압 70% 수준의 음압을 생성하여 파지한다. 공압 그리퍼는 비교적 큰 힘으로 당길 수 있으며 설비 운용 비용이 적게 드는 장점이 있다. 하지만 그리퍼를 작동하기 위해 공압 펌프, 밸브, 배관 설비 등을 설치해야 하므로 초기 설비 비용이 많이 든다.

진공 그리퍼 컵의 모델링은 컵 내부와 외부의 압력 차이로 발생하는 파지력, 파지 물체의 중력, 이동 시 발생하는 관성력, 컵과 물체 표면의 마찰력을 상황에 맞게 고려하면 된다. 진공 그리퍼는 접촉면에 수직인 방향으로 당기는 데 사용하지만, 그림의 case 1과 같이 중력 반대 방향으로 작동시키는 것이 대부분이다. 접촉면이 중력과 동일한 방향일 때 접촉면의 전단력은 마찰력에 의존하여 음압에 의한 힘의 50% 이하로 작다.

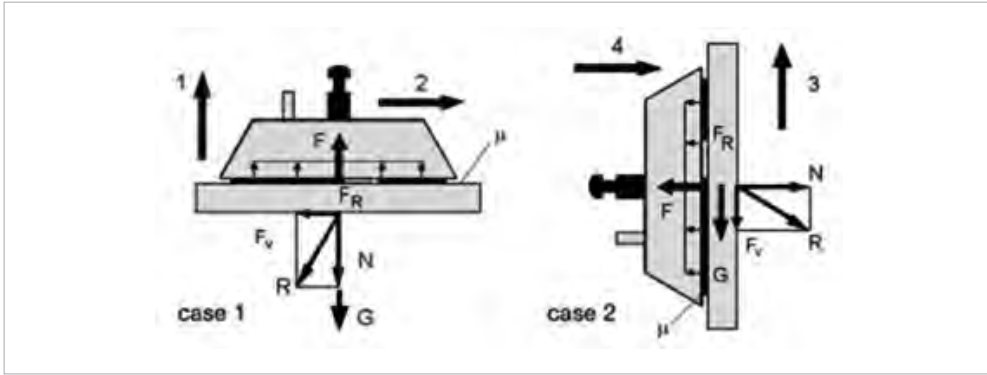


그림 6-7 진공 그리퍼 방향에 따른 작용 힘 모델링 [1]

작업 방향에 따라 컵에 작용하는 힘을 모델링하면 다음 표와 같이 정리할 수 있다.

자유물체도	파지 성공 조건
	$F_s \geq n_1 F$
	$F_s \geq F(n_1 \cos \alpha + n_2 / \mu \sin \alpha)$
	$F_s \geq n_2 F / \mu$

여기에서 F_s : 진공 파지력, F : 총하중, n_1, n_2 : 안전계수, μ : 마찰계수이다.

진공 파지력은 다음의 압력식으로 표현하는 것이 유리하다.

$$F_s = \Delta P A$$

여기에서 ΔP 는 외부 압력과 컵 내 압력의 차이, A 는 진공 컵의 파지 면적이다.

진공 그리퍼의 운영에 따른 필요 파지력을 계산하면 필요한 압력을 알 수 있고, 필요한 유량을 같이 고려하면 진공펌프 용량을 선정할 수 있다.

예제

원뿔형 진공 그리퍼의 컵이 직경 5cm, 높이 5cm이고 0.1bar 압력으로 작동한다고 하자. 이 컵을 흡착하는 데 1초가 걸린다면 필요한 펌프 파워는 얼마인가?

필요한 유량은 컵의 부피 $V_c = \frac{\pi r^2 h}{3} = 32.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ 에서 구하면

$Q = 32.7 \cdot \frac{10^{-6} \text{ m}^3}{\text{s}}$, 작동압력 $P=0.9\text{bar}=90\text{kN/m}^2$ 이므로 필요한 모터 파워는 3Watt 급이다.

3. 파지

그리퍼 혹은 손으로 물건을 파지하는 것은 물체 표면에 손가락으로 접촉하여 접촉점에 힘을 가해 물체의 중량에 의한 중력이나 이동에 의해 생기는 관성력을 이겨내고 접촉을 유지하는 것이다. 이때에 고려할 것은, 1) 접촉점에서 손가락으로 물체에 가하는 접촉력은 미는 힘이고, 2) 접촉점에서 미끄러지는 것은 마찰력과 관련이 있다는 점이다. 1)은 외부에서 가해지는 임의의 힘 벡터에 대해 평형을 이룰 수 있는 손가락 접촉력의 벡터 합을 찾을 수 있어야 하는데, 접촉력은 누르는 힘만 만들기 때문에(impactive gripper) 누르고 당길 수 있는 일 반적인 벡터와는 다르다.

수학적으로 표현하면 평면의 모든 점을 실수 두 개로 표시되는 벡터로 표현하고자 한다면 2개의 방향이 다른 벡터의 합과 차를 이용하면 가능하다. 파지의 경우 누르는 힘만 작용하기 때문에 힘의 합만이 가능하다. 따라서 벡터의 양의 합으로만 평면의 모든 점을 표현하기 위해서는 최소한 3개의 벡터가 필요하다. 2)는 접촉점의 모델링과 미끄러짐에 대한 모델링

으로 설명할 수 있다. 본 교재에서는 2)에 대해 보다 자세히 논의한다.

3.1 파지 정역학

로봇 그리퍼의 파지 상태를 다음 그림과 같이 단순화하여 생각해 보자. 파지 상태가 유지 되려면 접촉점 C 에 작용하는 접촉력이 물체의 중량 및 이동에 따른 관성력 등의 외력과 평형을 유지할 수 있어야 한다. 또한, 관성좌표계 P , 물체좌표계 O , 접촉점 C 에 대해 로봇 그리퍼가 물체에 접촉하는 점과 공간상에서 움직이는 물체 O 위 접촉점의 움직임이 동일해야 한다는 것이 파지의 기본적인 제한 조건이다. 전자는 힘닫힘(force closure)의 개념이고 후자는 근본파지제약조건(fundamental grasping constraint)이다. 이들이 개념을 정의하고 모델링하기 위해 필요한 파지행렬(grasping matrix)을 포함한 관련 내용을 알아보자.

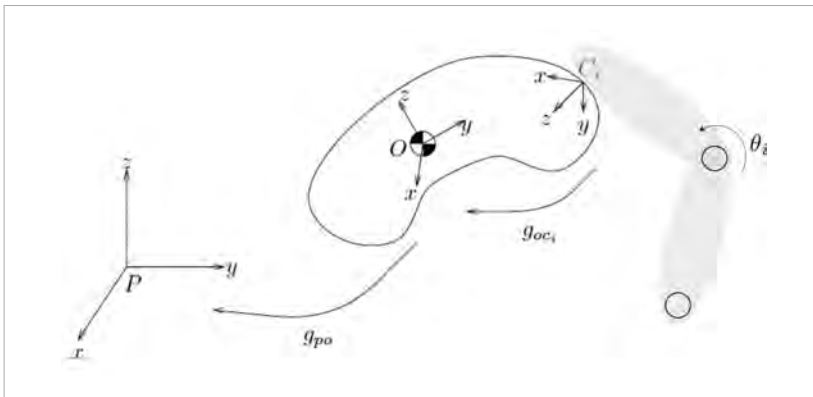


그림 6-8 그리퍼와 파지 물체의 접촉점 및 좌표계

3.1.1 접촉 모델(contact models)

접촉점에서 미끄러짐에 따라 접촉 모델을 정의할 수 있다. 마찰이 없는 매끈한 물체 표면에 젓가락같이 비교적 뾰족하고 강한 그리퍼로 물체를 접촉한다고 가정하자. 이 경우 접촉점에 작용하는 힘은 젓가락이 물체 표면에 수직인 방향으로 물체를 누르는 힘이 전부다. 3차원 좌표 공간에서 일반적으로 작용할 수 있는 힘은 선형 방향의 3축 힘 그리고 회전 방향의 3축 토크이다. 이를 렌치(wrench)라고 하는데, 젓가락이 물체에 작용하는 렌치(F_{ci})는 접촉 면에서 표면에 수직인 방향으로 누르는 힘(f_{ci})이 z 방향으로 작용하고 있으므로 다음 식

으로 표현할 수 있다.

$$F_{c_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_{c_i}, \quad f_{c_i} \geq 0$$

이렇게 마찰 없이 수직 방향 힘만이 작용하는 경우(PwoF: Point contact Without Friction)는 실제로는 없지만 표면 마찰 특성을 모르거나 접촉을 단순하게 모델링할 때에 사용된다.

접촉 면에서 마찰이 있거나 그리퍼나 물체의 표면에 변형이 생기면 접촉 모델은 달라진다. 우선 표면 접촉 면에 마찰이 있다고 하자. 마찰은 복잡한 현상이지만 아주 단순하게는 쿨롱(Coulomb's) 마찰로 모델링할 수 있다. 접촉 면에서 미끄러짐이 없다면 접선 방향 힘(f^t)은 수직 방향 힘(f^n)과 다음의 관계를 갖는다.

$$|f^t| < \mu f^n$$

3차원 공간에서 이 힘의 관계를 그리면 콘 형상이기 때문에 이를 마찰뿔(FC: friction cone)이라 한다.

이제 다시 로봇 그리퍼의 접촉 문제로 돌아가 보자. 마찰이 있는 표면에서 로봇 그리퍼가 접촉점에서 미끄러지지 않는다는 것(HF: Hard-Finger)을 수식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{c_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} f_{c_i}, \quad f_{c_i} \in FC_{c_i}$$

여기에서 $FC_{c_i} = \left\{ f \in \mathbb{R}^3 : \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \mu f_z, f_z \geq 0 \right\}$ 이다.

로봇의 그리퍼 표면이 고무 재질로 되어 있고 물체의 표면도 단단하지 않으면(SF: Soft-Finger) 접촉점에서 z 방향의 회전에 대한 마찰도 생기므로 다음과 같이 접촉력을 표현할 수 있다.

$$F_{c_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} f_{c_i}, \quad f_{c_i} \in FC_{c_i}$$

여기에서 $FC_{c_i} = \left\{ f \in \mathbb{R}^3 : \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \mu f_z, f_z \geq 0, |\tau_z| \leq \gamma f_z \right\}$ 이다.

이를 일반화하면 접촉 모델은 접촉점의 상태가 PwoF, HF, SF에 따라 렌치 베이스스(Wrench Basis) B_{c_i} 와 마찰뿔을 이용하여 정의할 수 있고 접촉점의 렌치는 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$F_{c_i} = B_{c_i} f_{c_i}, \quad f_{c_i} \in FC_{c_i}, \quad B_{c_i} \in \mathbb{R}^{p \times m_i}$$

여기에서 p 는 문제가 정의된 힘 공간의 크기(3차원 공간이면 6, 2차원 평면이면 3)이고 m_i 는 접촉점에 독립적으로 작용하는 힘의 수이다.

3.1.2 파지행렬(Grasp Matrix)

파지력이 물체에 미치는 영향을 알기 위해서는 로봇의 접촉점 좌표계에서 정의된 접촉력을 물체 좌표계로 변환해야 한다. 이를 정의하는 것이 파지행렬(Grasp Matrix)이다.

접촉점 c_i 에서 좌표계를 물체 좌표계 O 로 표현하려면 위치벡터(P_{oci})와 회전변환행렬(R_{oci})을 이용하면 된다.

물체 좌표계 O 로 표현한 접촉점 c_i 의 접촉력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_o = \begin{bmatrix} R_{oc_i} & 0 \\ \hat{p}_{oc_i} R_{oc_i} & R_{oc_i} \end{bmatrix} B_{c_i} f_{c_i}$$

여기에서 $\begin{bmatrix} R_{oc_i} & 0 \\ \hat{p}_{oc_i} R_{oc_i} & R_{oc_i} \end{bmatrix} =: Ad_{g_{oc_i}}^T$ 이고 파지행렬 G_i 는 $Ad_{g_{oc_i}}^T B_{c_i}$ 로 정의한다. $\hat{p}$ 는 벡터의 행렬곱을 의미하며 반대칭행렬(skew symmetric matrix) $\begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix}$ 로 정의된다.

파지 점이 여럿 있다면 다음과 같이 된다.

$$F_o = \begin{bmatrix} G_1 & \cdots & G_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{c_1} \\ \vdots \\ f_{c_k} \end{bmatrix} = G f_c$$

예를 통해 이해해보자.

다음 그림과 같이 소프트 그리퍼(SF) 2개가 서로 마주하며 상자를 파지하는 경우를 생각하자.

왼쪽 그리퍼의 접촉점을 c_1 , 오른쪽 그리퍼의 접촉점을 c_2 라 하자. 물체의 가운데에 물체 좌표계가 그리고 각각의 접촉점에 접촉 좌표계가 그림과 같이 정의되어 있다. 우리는 그리퍼의 지역 좌표계로 표현되는 파지력 $(f_x^{c_i}, f_y^{c_i}, f_z^{c_i}, \tau_z^{c_i})$ 이 물체 좌표계 O 에서 어떻게 표현되는지를 알고 싶다.

O 에 대한 각 파지 점 좌표계는 다음의 회전변환행렬과 위치벡터로 표현할 수 있다.

$$R_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, p_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ -r \\ 0 \end{bmatrix}, R_{c_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, p_{c_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{bmatrix}$$

각 파지 점은 소프트핑거(SF)이므로 파지행렬 G_i 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$G_i = \begin{bmatrix} R_{o_{C_i}} & 0 \\ \hat{p}_{o_{C_i}} R_{o_{C_i}} & R_{o_{C_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

접촉력은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_c = (f_x^{c_1}, f_y^{c_1}, f_z^{c_1}, \tau_z^{c_1}, f_x^{c_2}, f_y^{c_2}, f_z^{c_2}, \tau_z^{c_2}) \in \mathfrak{R}^8$$

접촉력을 입력으로 받는 2지 파지행렬을 정리하면 다음과 같다.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -r & 0 & 0 & 0 & 0 & +r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & +r & 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

또한 접촉력의 성분은 미끄러지지 않아야 하므로 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\mathbf{f}_c \in FC = FC_{c_1} \times FC_{c_2}$$

$$FC_{c_i} = \left\{ f_c : \sqrt{(f_x^{c_i})^2 + (f_y^{c_i})^2} \leq \mu f_z^{c_i}, |\tau_z^{c_i}| \leq f_z^{c_i}, f_z^{c_i} \geq 0 \right\}$$

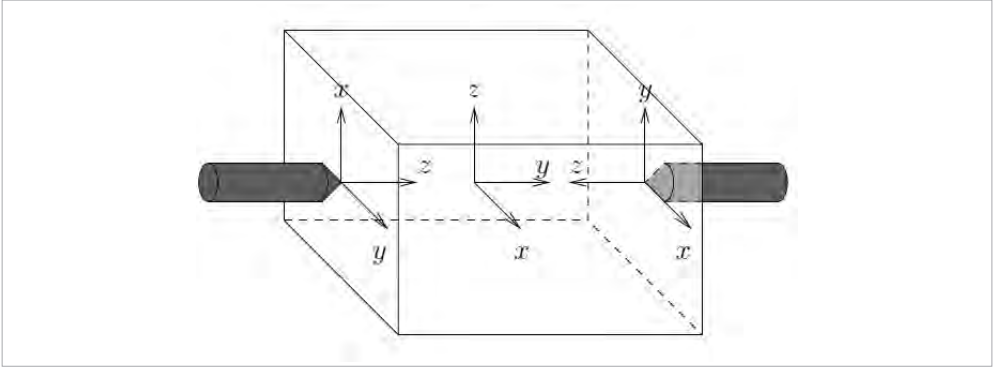


그림 6-9 상자 파지 예 [3]

3.1.3 힘닫힘(Force Closure)

파지된 물체에 작용하는 임의의 외력에 대해 평형을 이룰 수 있는 파지력을 찾을 수 있다면 힘닫힘이 이루어졌다고 한다.

파지행렬 $G \in \mathbb{R}^{p \times m}$ 가 주어져 있을 때에 힘닫힘은 다음의 조건으로 판단할 수 있다.

1. G 의 열벡터(column vector)가 힘 공간 p 를 양의 포괄(positive span)한다.
2. G 의 열벡터(column vector)가 이루는 볼록껍질(convex hull)이 원점 주변(a neighborhood of the origin)을 포함한다.
3. G 의 모든 열벡터(column vector) G_i 에 대해, $v \cdot G_i \geq 0$ 을 만족하는 영이 아닌 v 는 존재하지 않는다.

예를 통해 이해해보자.

평면에서 직각사각형 상자를 네 군데 접촉점에서 파지하는데, 왼쪽과 같이 모퉁이에 가깝게 파지하는 상태와 오른쪽과 같이 네 변 중앙을 파지하는 경우를 생각해보자.

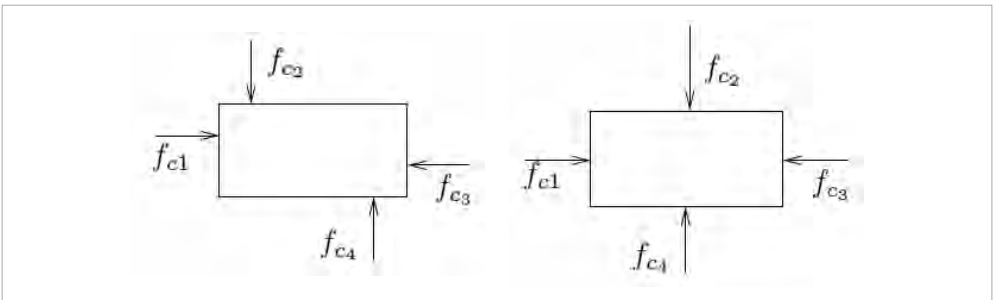


그림 6-10 평면 파지의 예

이러한 두 경우 모두를 포함하는 파지행렬은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -a & b & -a & b \end{bmatrix}$$

왼쪽의 경우는 앞에서 설명한 3개의 조건이 모두 만족되어 FC가 성립한다.

하지만 물체의 중심을 파지하는 오른쪽의 경우, 각 파지력은 중심을 통과하기 때문에 모멘트를 생성할 수 없으므로, $a=b=0$ 이 되어 G 는 세 번째 행이 모두 0이 된다. 즉, G 를 이용하여 세 번째 힘 공간을 포함할 수 없다. G 의 열벡터로 이루어진 블록껍질은 모두 x - y 공간에만 힘을 만들 수 있고 z 축 회전력을 만들 수 없으므로 원점의 주변을 모두 포함할 수 없다. 또한 $v=(0, 0, 1)$ 이면 $v^T G=0$ 이 되어 세 번째 조건을 만족할 수 없다. 따라서 힘닫힘이 아니다. 수학적 모델에서 이야기하듯, 오른쪽과 같이 파지하면 회전력의 외력에 대해 대항할 수 없다.

3.1.4 마찰 모델의 확장

마찰이 작용하는 경우 접촉점에서 마찰뿔로 마찰 상황을 설명할 수 있다고 했다. 평면에서 마찰뿔은 그림 6-11의 두 번째와 같이 두 개의 사선으로 표현할 수 있다. 즉, 선형식으로 마찰 조건을 표현할 수 있다. 그러나 공간상으로 확장하면 원뿔(cone)은 수식적으로 선형식이 아니다. 블록껍질에서 원점의 포함 여부를 계산하는 것은 선형 방정식을 이용하여 계산할 수 있으나 원뿔 형상을 그대로 고려하면 블록껍질의 원점 포함 여부를 계산하는 것은 어려운 문제가 된다. 그래서 세 번째나 네 번째 그림과 같이 원뿔을 다각형으로 근사하여 마찰뿔을 고려한다. 비선형 방정식을 이용하는 방법도 연구된 바 있다.

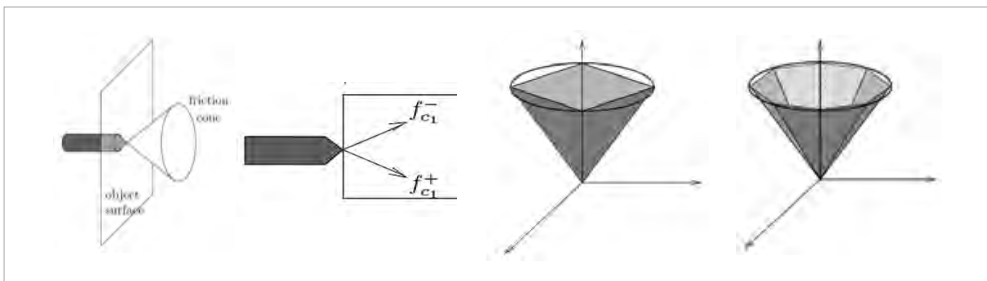


그림 6-11 마찰뿔 모델링 [3]

3.2 파지 기구학

서론에서 우리는 파지에 필요한 기구학적인 구속 조건에 대해 간단하게 논의했다. 이에 대해 조금 더 자세히, 하지만 대략적으로 알아보자. 파지 상태에서 로봇 손가락의 움직임은 접촉점 기준으로 물체의 움직임과 같아야 한다. 이를 대략적으로 표현하면 다음과 같다.

$$J\dot{q} = v_{cc,hnd} = v_{cc,obj} = G^T v$$

여기에서 자코비안(J)은 로봇손 접촉점에 대한 것이고 v 는 물체의 속도(twist)를, 전치파지 행렬(G^T)은 파지된 물체의 좌표계에서 접촉점 좌표계로의 변환으로 이해하면 된다.

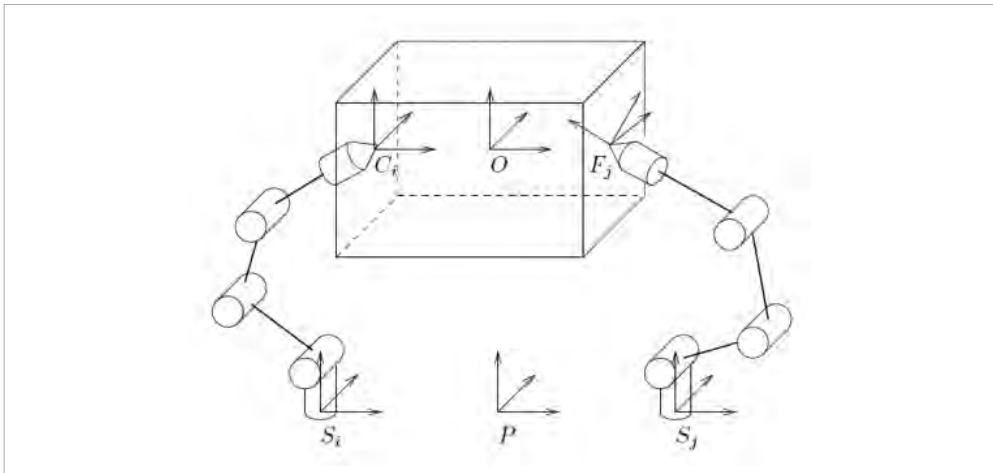


그림 6-12 로봇손 파지 [3]

예제를 통해서 살펴보자. 다음 그림과 같이 2지 로봇 그리퍼가 반지름 r 의 구를 파지하고 있는 경우를 생각하자. 두 손가락 모두 SF 모델을 사용하자.

자코비안과 파지행렬을 구하면 다음과 같다.

$$G^T = \begin{bmatrix} -c_1 & -s_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & -r \\ 0 & 0 & 1 & rs_1 & -rc_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_1 & -s_1 & 0 \\ -c_2 & -s_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & -r \\ 0 & 0 & 1 & rs_2 & -rc_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_2 & -s_2 & 0 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} -l_1 & -l_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ l_2 & l_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_6 & 0 \\ 0 & 0 & d & \frac{\sqrt{2}}{2}(l_4 + l_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

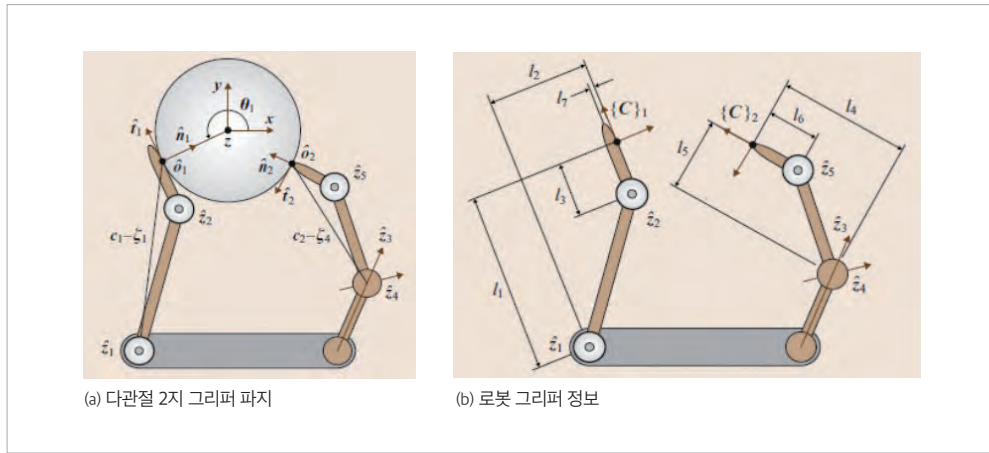


그림 6-13 파지 좌표 정의 [4]

이제 성공적인 파지를 위한 파지력 생성 방법을 논의해보자. 로봇 손가락의 운동 방정식과 물체의 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_{hnd}(q)\ddot{q} + b_{hnd}(q, \dot{q}) + J^T \lambda = \tau$$

$$M_{obj}(u)\dot{v} + b_{hnd}(u, v) - G\lambda = g$$

여기에서 q 는 로봇 그리퍼의 관절각, u 와 v 는 각각 물체의 위치 및 속도(twist), $M_{hnd}(q)$ 와 $M_{obj}(u)$ 는 각각 로봇 그리퍼와 물체의 관성질량, $b_{hnd}(q, \dot{q})$ 와 $b_{hnd}(u, v)$ 는 속도곱이 포함된 관성력, J 는 로봇 그리퍼의 자코비안, G 는 파지행렬, λ 는 접촉력, τ 는 그리퍼 관절 토크, g

는 중력과 같이 물체에 작용하는 외력이다. 아주 천천히 움직인다고 하면 앞의 식은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\begin{aligned} J^T \lambda &= \tau \\ -G \lambda &= g \end{aligned}$$

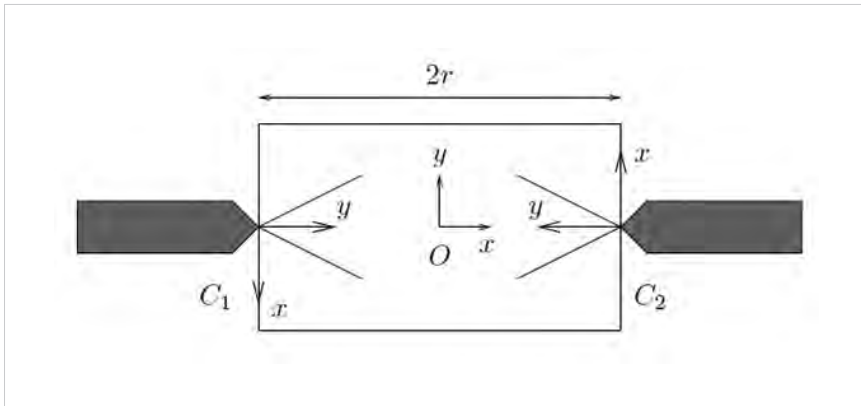
관절 토크 제어가 가능하면 다음의 제어기로 파지할 수 있다.

$$\tau = -J^T G^+ g + J^T N(G) \gamma$$

여기에서 G^+ 는 의사역행렬, $N(G)$ 는 영공간(Null space)이다. 여기에 관절각 오차를 보상하기 위해 PD 제어기를 추가할 수 있다.

 :: 연습문제

01 평면하드핑거(HF) 파지일 때 파지행렬(grasp matrix) G 를 찾아라.

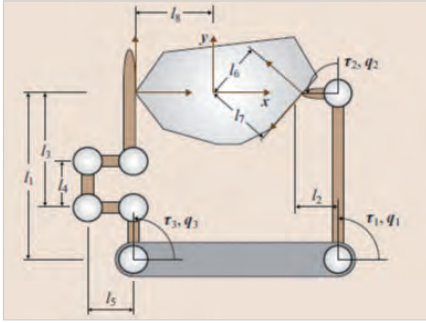


답 $G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ r & 0 & r & 0 \end{bmatrix}$

02 다음의 HF 파지에 대해 J^T , G 를 구하라. (오른쪽 손가락에 관절 1, 2가 있다).

문제를 단순화하기 위해 다음의 변환 행렬을 가정하자.

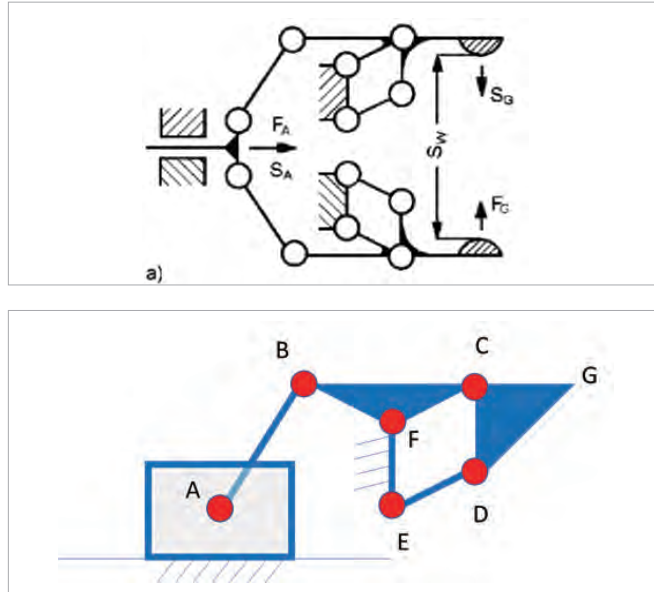
$$R_1 = \begin{bmatrix} -0.8 & -0.6 \\ 0.6 & 0.8 \end{bmatrix}, R_2 = I_2$$



답 $G = \begin{bmatrix} -0.8 & -0.6 & 1 & 0 \\ 0.6 & -0.8 & 0 & 1 \\ l_6 & -l_7 & 0 & -l_8 \end{bmatrix}$

$$J^T = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}, J_1 = \begin{bmatrix} -0.8l_1 & 0.6l_1 \\ -0.6l_2 & 0.8l_2 \end{bmatrix}, J_2 = \begin{bmatrix} -l_1 & 0 \\ -l_3 & 0 \\ -l_3 & l_5 \\ -l_3 + l_4 & l_5 \\ -l_3 + l_4 & 0 \end{bmatrix}$$

03 그림 6-5의 역와트체인(Inverted Watt Chain)을 이용한 그리퍼에 대해 다음 조건일 때 기계이득(Mechanical Advantage)을 구하라. 그림에서 왼쪽은 그리퍼의 개략도이고 오른쪽은 이를 링크와 조인트로 표현한 것이다. 여기에서 AB의 길이는 2, BC의 길이는 $\sqrt{3}$, FC, CD, DE, EF의 길이는 1, CG의 길이는 1이고 벡터 AB는 수평면에 대해 60도, 삼각형 BCF는 이등변 삼각형으로 양쪽각은 30도, 각 DCG는 90도이다.



참고문헌

- [1] Weinheim. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk, Robot Grippers. Wiley, 2007 (ISBN: 978-3-527-40619-7 G)
- [2] TOWNSEND, William. The BarrettHand grasper-programmably flexible part handling and assembly. Industrial Robot: an international journal, 2000.
- [3] Murray, Richard M., Zexiang Li, and S. Shankar Sastry. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC press, 2017.
- [4] Domenico Prattichizzo, Jefferey C. Trinkle, "38. Grasping," Springer Handbook of Robotics, Springer, 2016

7

인간-로봇 상호작용



컴퓨터 시스템, 항공, 로봇 등 모든 기계의 개발 초기에는 개발자가 기계의 제약을 고려하여 기계에 맞추어가는 개발을 하게 된다. 이 시기는 **기계 중심의 개발 단계**이다. 이때는 기계 생산 시의 제약이 많다. 즉, 개발자들이 자신의 역량을 발휘하기에는 턱없이 척박한 개발 환경으로 인해 개발에 많은 고생을 하기 마련이다. 예를 들어, 1960년대 초창기 컴퓨터 프로그램 개발의 경우, CPU, 메모리의 한계가 많아 프로그램 개발에 제약이 매우 많았다. 그 당시 좋은 프로그래머라면 메모리 용량의 한계로 코드 한 줄이라도 덜 작성해야만 했다. 당연히 프로그래머의 창의적 아이디어를 구현하기에는 많은 문제들이 따르게 되었다.

그러나 기계 설계와 개발 기술의 발전이 거듭할수록 기계의 제약이 완화되고, 개발자에게 편리한 개발 환경 속에서 개발자 편의가 보장된 설계와 제작을 하게 된다. 이 시간은 **개발자 중심의 단계**이다. 기계나 건축 설계의 경우, CATIA와 같은 CAD/CAM 솔루션 프로그램을 사용하여 기존의 기계 설계의 한계를 극복하여 개발자가 편리하게 그리고 쉽게 설계할 수 있게 되어, 제품 생산 시간을 단축하게 만들 뿐 아니라, 원가 절감과 품질 향상까지 이루어졌다. 소프트웨어 개발의 경우, 소프트웨어 위기(software crisis) 이후, 개발자에게 편의가 제공되는 다양한 소프트웨어 공학 기법들이 등장하면서 기계 중심에서 개발자 중심의 시대가 오게 되었다.

이렇게 기계/시스템 개발 패러다임이 기계 중심에서 개발자 중심으로 옮겨가게 되면, 이후에는 **사용자 중심의 단계**로 진화하게 된다. 컴퓨터의 경우를 생각해 보자. 기계 중심의 개발 패러다임에서 개발자 중심의 개발 패러다임으로 바뀌면서, 소프트웨어 공학(Software

Engineering)이라는 학문이 탄생한 바 있다(Pressman, 2004). 그러나 컴퓨터가 대중화되기 시작하면서, 컴퓨터 과학자들은 사용자 중심의 새로운 개발 패러다임을 맞이하게 된다. 이 시기의 한가운데에 서 있는 학문이 바로 인간 컴퓨터 상호작용(HCI, Human Computer Interaction)이다. 사용자들은 컴퓨터 시스템 내부 구조에 대해서는 관심도 없고 실제로 아는 것도 거의 없다. 하지만 스크린상에 나타나는 인터페이스에 대해서는 많은 것을 알고 있다. 오늘날 프로그램 코드의 75퍼센트는 사용자와의 인터페이스를 다루고 있다(Kapor, 1996). 그만큼 이 시기에는 개발자가 제작해 놓고 “내가 만든 시스템에 사용자가 맞추어 사용하라”고 명령하는 것이 아니라, 사용자의 목소리를 듣고 사용자를 위해 사용자 인터페이스에 많은 것을 쏟아 붓는 것이 중요하다.



그림 7-1 컴퓨터공학에서 개발 패러다임의 진화

HCI의 기본 철학은 <사용자 중심>에 있다. 그리고 HMI, Human Machine Interaction은 HCI의 철학과 방법이 기계(Machine) 제작에 확대된 학문 영역을 뜻한다. 인간-로봇 상호작용(HRI, Human Robot Interaction)의 경우, HCI의 그것이 로봇(Robot)으로 적용된 학문 영역이다. 그런 점에서 HCI는 HMI와 HRI의 뿌리가 된 학문이라 봐도 무방할 듯하다. 이번 장에서는 HRI의 근간이 되는 HCI에 대해 알아보고, 뒤이어, 본 교재의 중심 주제인 로봇을 중심으로 한 HRI를 알아보려고 한다.

1. 인간 컴퓨터 상호작용

본 절은 HCI(Human Computer Interaction)에 대해 개괄적으로 소개하는 절로, 이번 장의 저자 김희철 교수의 저서 <인간과 컴퓨터의 상호작용: 인컴학을 향하여>(김희철, 2005)의 1장, 2장, 8장을 요약, 추가, 수정하였으며, HRI 이해의 기반이 되는 HCI에 대해 알아야 할 기본 지식을 제공한다.

HCI 시대는 개발자 중심이 아니라 **사용자 중심**의 시대이며, 자연스럽게 **인간 중심**의 시대를 의미한다. 그래서 HCI는 기계의 성능만을 높이기 위한 신기술 개발의 집착에서 벗어나, 컴퓨터를 사용하는 인간을 바로 이해하고 인간에게 맞는 시스템을 개발하고 평가하는 원리와 방법들을 연구하고 제시하는 학문이다. 우리는 이 절에서 HCI가 어떤 학문인지에 대한 개략적인 이해를 얻게 된다. 그리고 HCI가 어떤 특징을 갖는 학문인지에 대한 이해를 돕고자 한다.

1.1 HCI의 정의

HCI에 대한 정의는 많이 있지만, 지금까지 학자들이 가장 많이 사용하는 정의는 ACM(Association for Computing Machinery) 내에 있는 HCI 분과인 SIGCHI(Special Interest Group on Computer-Human Interaction)가 세운 정의로, 다음과 같다. (ACM/SIGCHI 1992, pp. 6)

“HCI는 인간이 사용하기에 적합한 인터랙티브 컴퓨터 시스템을 설계-평가-구현하는 과정과 이를 둘러싼 주요 현상들에 대해 연구하는 학문이다.”

“Human-computer interaction is a discipline concerned with the design, evaluation and implementation of interactive computing systems for human use and with the study of major phenomena surrounding them.”

이 정의와 관련하여 해석의 핵심이 되는 네 가지의 표현을 중심으로 HCI의 정의를 탐구해 보고자 한다: 인간이 사용하기 적합함, 인터랙티브 시스템, 설계-평가-구현하는 과정, HCI 현상(둘러싼 주요 현상).

인간이 사용하기에 적합함(for human use)

이는 무엇을 의미할까? 첫째, 컴퓨터라는 기계의 제작이나 평가는 ‘인간’의 입장에 맞추어져야 한다는 것을 뜻한다. HCI 시대 이전에는 컴퓨터란 소수만이 사용하는 기계였다. 이 때는 컴퓨터 시스템들이 사용하기 어려워도 이것이 문제가 되지 않았다. 오히려 사용자들은 어려운 기계를 잘 다룰 줄 아는 엘리트 의식을 갖기에 충분했다. 어려운 컴퓨터 시스템을 사용자들이 사용해야 할 때, 우리는 기계 중심의 시대에 살고 있다고 할 수 있다. 그러나 ‘인간이 사용하기에 적합함(for human use)’이란 표현이 중요시되는 시기는 바로 사용자 인간 중심의 시대에 살고 있음을 의미한다. HCI는 기계에 인간을 맞추는 것을 배격하고, 기계가 인간의 활동에 맞추어져야 한다는 기본 철학을 가지고 시작된 학문이다.

둘째로, HCI는 사용의 편리함 또는 사용의 용이성만을 추구하는 학문이 아니라는 것이다. SIGCHI의 정의에서 ‘편리한’ 시스템이라 말하지 않고 ‘인간이 사용하기에 적합한’ 시스템이라고 표현한 것에 유의할 필요가 있다. HCI를 처음 접할 때, 사용하기에 쉽고 편리한 시스템을 제작하는 데에 HCI라는 학문의 이론적 배경이 필요하다고 믿기 쉽다. 이는 어느 정도 사실이다. 하지만 사용의 용이성뿐 아니라, 안정성(safety), 효율성, 학습의 용이성, 프라이버시까지도 고려하여 시스템을 제작하고 평가할 수 있어야 한다.

인터랙티브 컴퓨터 시스템(interactive computing systems)

SIGCHI의 정의에서 우리는 인터랙티브 컴퓨터 시스템이라는 표현을 발견하게 된다. 여

기서, HCI에서 강조되는 용어는 컴퓨터 시스템과 사람 사이의 **상호작용(interaction)**에 있음을 알 수 있다. HCI(Human Computer Interaction)는 문자 그대로 사람과 컴퓨터 사이에 벌어지는 상호작용을 뜻한다. 즉, HCI는 컴퓨터와 그 사용자들 사이에 이루어지는 대화와 커뮤니케이션을 연구하는 학문이다. 따라서 컴퓨터와 인간 사이 대화의 흐름을 매끄럽게 해주고, 시스템의 의도와 인간의 의도가 서로 잘 전달될 수 있는 시스템을 만드는 것이 HCI가 갖는 하나의 중요한 연구 목적이 된다. 이를 위해서는 인간과 컴퓨터의 대화 양식과 구조, 패턴을 체계적으로 분석하고 제작, 평가하는 작업은 필수적이다. 그래서 인간과 컴퓨터의 상호작용을 돕기 위해서는 인간의 인지적 특성이나 시스템의 제한점 등을 동시에 잘 이해하고 있어야 한다.

설계-평가-구현하는 과정

컴퓨터 과학의 궁극적 목적은 시스템을 설계, 제작하는 것이다. HCI 역시 컴퓨터 시스템을 설계하고 평가하고 구현하는 과정에 필요한 원칙을 발견하고 제공하기 위해 요구되는 학문이다. 하지만 설계, 평가, 구현하는 과정에 있어서 그 방법과 관점에서 전통적인 컴퓨터 과학의 시각과는 사뭇 다르다. HCI 연구에서는 컴퓨터는 물론 인간을 연구하는 것이 필수적이기 때문에 심리학, 사회학, 인지과학, 언어학, 디자인 등의 다양한 학문이 결합되어 있다. 그래서 시스템의 개발 평가 방법은 컴퓨터 과학의 방법과는 다를 수밖에 없다.

필드(field) 연구, 사용자 테스트, 인터뷰 등의 방법이 사용되는 것은 매우 흔한 일이다. 시스템 요구 분석을 할 때, 컴퓨터 과학이 추구하는 수학적인(formal) 방법을 탈피하여 인문학적 방법을 사용하기도 하며, 전통적인 과학적인 방법을 넘어서 질적인(qualitative) 분석이나 기술적인(descriptive) 방법을 사용하기도 한다. 그리고 휴리스틱(heuristics)과 같은 비형식적인 방법도 자주 사용된다.

HCI 현상

모든 연구와 탐구가 시스템의 설계-평가-구현에 관한 것이 될 수는 없다. 때로는 시스템 개발이나 평가와는 직접적인 상관이 없어 보이는 현상들을 탐구해야 할 때도 있다. 그런데 시스템 개발과 평가에 직접적으로 연관되지 않은 수많은 결과 역시 HCI 연구의 가치를 가지고 있다. 문화적인 영향, 시스템 적응 및 학습, 개인 사용자나 조직의 심리, 인간의 행동 및

대화 등을 이해하기 위한 모든 연구는 시스템 개발자들을 직접적으로 만족시켜 줄 수도 있지만 그렇지 못하는 경우가 많다. 결국 HCI는 시스템 개발과 평가라는 궁극적 연구 목적 이외에도, 컴퓨터를 사용하는 인간에 대한 이해를 얻기 위한 학문인 것이다. 이것이 바로 HCI를 둘러싼 주요 현상(HCI 현상)을 이해한다는 것을 의미한다.

1.2 융합정보과학으로서의 HCI

HCI는 ‘컴퓨터가 왜 필요한가?’라는 근본적인 질문에 대해서 전통적인 컴퓨터 과학이 추구하는 것과는 다른 또 하나의 해답을 주려 하는 학문이다. 그동안 컴퓨터 과학은 지속적인 신기술 개발을 통해 그 가치를 인정받아왔다. 새로운 기술 개발이 늘 학문의 주목적이었다. 그러나 ‘개발된 시스템이 사용하기 편리한가?’, ‘사용자의 요구에 잘 부응하는 것인가?’라는 지극히 핵심적인 이 물음들에 대해서는 진지한 관심과 노력을 기울이지 못해왔다. 기술만 꾸준히 발달하면 저절로 사용자의 삶을 윤택하게 그리고 편리하게 할 수 있을 것이라는 애매한 해답을 줄 수밖에 없었다.

HCI는 바로 앞의 질문들에 명쾌한 해답을 주기 위한 학문이다. 어떤 의미에서 HCI는 ‘컴퓨터가 왜 필요한가?’라는 물음에 대한 진지한 답을 얻고자 하는 데에서 그 학문의 출발점이 있다고도 볼 수 있다. HCI는 기존의 컴퓨터 과학과는 여러 가지 면에서 다른 관점을 가지고 있다.

학제간의 새로운 연구 방법

컴퓨터 과학은 이제 더 이상 기술만을 중시하고 수학적 방법만을 추구하는 분야가 될 수 없다. 이 문제에 대해 Kling은 다음과 같이 말하고 있다.

“컴퓨터 과학의 근본이 되는 수학적 모델들은 어떤 인터페이스가 어떤 그룹의 사용자들에게 더욱 효과적인지를 설명하기 위한 이론적 기초를 제공하지 못한다. 효율적인 인터페이스의 이론 기초는 인간의 행동과 경험적 증거에 의존한다.” - (Kling, 1993)

HCI의 연구 대상은 컴퓨터와 컴퓨터 시스템이다. 그래서 HCI는 전통적 의미의 과학이요, 기술이다. 그런데 HCI는 동시에 인간을 연구 대상으로 한다. 우리가 관심을 가져야 할 것은

심리학, 사회학, 인류학, 문화인류학, 언어학, 교육학 등의 인문학에서 사용하는 연구 방법들이 HCI라는 학문에 그대로 적용된다는 것이다. 문화인류학자들은 어느 사회나 조직의 문화나 삶의 양식, 소통 수단 등을 연구하기 위해 사람들과 사회를 자세히 관찰한다. 그리고 이를 다양한 방법으로 기록하고 기록된 데이터를 해석한다. 전통적인 컴퓨터학자들은 이런 방법을 거의 사용하지 않는다. 그런데 HCI 전문가는 다르다. 가시적인 결과로써 시스템을 개발하는 것 이상으로 중요하게 생각하는 것이 시스템 사용자에 대한 이해이다.

비행장 관제사들의 작업을 돕기 위한 어떤 시스템을 만든다고 생각해 보자. HCI 전문가는 우선 관제사들이 일하는 관제탑에 직접 가서 관제사들이 어떻게 일하는지 관찰하려 할 것이다. 비디오로 이들의 일하는 모습을 녹화하기도 할 것이며, 때에 따라 이들과 인터뷰를 할 지도 모른다. 왜냐하면, 이들이 일하는 방식, 문화 등을 잘 알아야 이에 맞는 사용성이 있는 시스템을 개발할 수 있기 때문이다. HCI는 학제간(interdisciplinary) 연구 분야이다. 전통적인 컴퓨터 과학과 달리, 과학의 방법은 물론, 다양한 인문학적 방법까지 이용하여 사용자 인간을 이해한다.



그림 7-2 학제간 연구로서의 HCI

1.3 HCI 학문의 진화

HCI가 컴퓨터 과학자들에게 널리 알려지기 시작한 시기는 90년대 중반이라고 할 수 있다. 이 시기부터 세계의 많은 컴퓨터학과에서 HCI를 교육과정에 포함시키기 시작했기 때문이다. 하지만 엄밀한 의미에서 HCI의 시작은 1960년대 초반이라 말할 수 있다. 그리고 70, 80, 90년대를 거쳐 21세기에 이르면서 HCI라는 학문은 상당한 변화를 겪게 된다.

60년대: HCI 태동기

1960년대 인간과 컴퓨터의 ‘상호작용(interaction)’을 꿈꾸고 있던 사람이 앵겔바르트(D. Engelbart)였다. 앵겔바르트는 이때 이미 마우스, GUI, 하이퍼텍스트, 워드 프로세서, 이메일을 개념화하고 최초로 이들을 구현했던 인물이다. HCI가 학문으로 크게 성장하고 있었던 1997년, 그는 이러한 인터랙티브 컴퓨팅에 대한 선구자적인 업적으로 컴퓨터 과학의 노벨상이라 불리는 튜링상을 수여한 바 있다. 앵겔바르트는 당시로써는 현실성 없는 인공지능 시스템 구현에 매달리는 것보다는 현재 가지고 있는 지식과 기술을 잘 활용하여 실현 가능한 인간 지능 고도화 시스템을 만들자는 생각을 가지고 있었다.

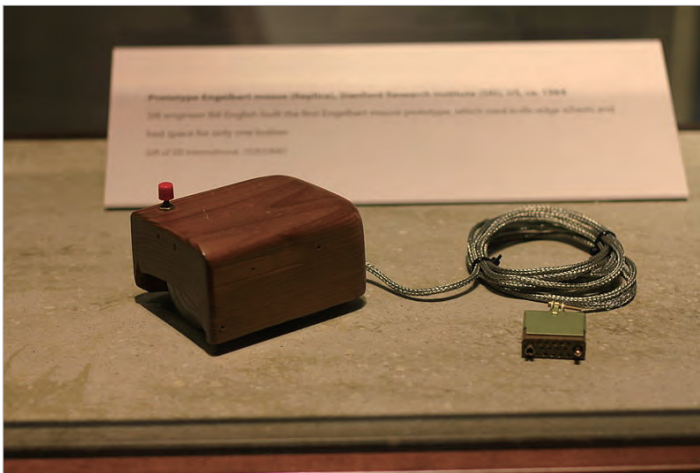


그림 7-3 앵겔바르트가 최초로 고안한 마우스

(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Douglas_Engelbart%27s_prototype_mouse_-_Computer_History_Museum.jpg)

70, 80년대: GUI의 현실화와 인적 요소 연구 시대

1970년대와 1980년대에 이르러 비로소 HCI가 학문다운 학문으로 성장하게 된다. 70년대 초반 Xerox PARC는 고해상도의 화면에 마우스까지 부착되어 있었고 기억용량과 실행속도 측면에서 진일보한 최초의 워크스테이션 Alto를 개발했다. Xerox는 급기야 80년대 초반 Star라는 사무 자동화 시스템을 만들어 출시하게 되는데, 당시의 다른 컴퓨터는 상상하지 못했던 비트맵 스크린, 윈도우, 마우스, 아이콘 등을 포함한 GUI 환경을 제공하고 있었다. 하지만 실행 속도가 너무 느렸던 Star는 상업적으로는 실패한 시스템이 되고 말았다. 그럼에도 불구하고 이후의 컴퓨터 산업에 미친 영향은 지대하다. 이는 Star의 소개로 사용자에게 편리한 인터랙티브(interactive) 시스템과 사용자 인터페이스가 어떻게 설계되어야 하는지의 모델을 제시했기 때문이다. Star 이후, Macintosh사의 애플 컴퓨터, 그리고 지금의 윈도우는 Star의 GUI 개념을 이어받은 Star의 후손이라 할 수 있다.

70년, 80년대 HCI는 컴퓨터 사용, 개발, 평가 등과 관련된 인적 요소를 연구하는 학문으로써 자리를 잡는다. 엄밀히 말하면, HCI를 위한 최초의 소개서가 등장한 것이 1983년인 것을 볼 때(Card, 1983), HCI가 하나의 학문으로 성립된 시기는 80년대 초반으로 보아야 한다. 특별히 70, 80년대에는 인지과학 또는 인지심리학이 학문적인 하나의 큰 흐름으로 자리 잡고 있었다. HCI 역시 인지과학의 영향을 많이 받았고, 당시의 HCI는 **인간공학(ergonomics)**과 그 모습에서 흡사한 측면을 가지고 있었다. 사회적으로는 80년대 초반에 Three Mile Island 원자력 발전소 참사와 같은 사건의 원인이 사용자들이 잘못을 저지러 수도 있는 영성한 인터페이스 설계에 있음이 알려지면서 HCI 연구의 필요성은 더욱 강조되기 시작했다.

90년대: 사회적 측면이 강조된 시대

90년대에 접어들면서 HCI를 보는 관점은 크게 소용돌이치게 된다. 큰 특징은 다양한 사회적 측면들이 HCI의 주요 주제로 떠오르기 시작한 것이다. 앞선 HCI 연구는 개인 사용자로서의 인간에 대한 연구가 그 중심에 있었다. 다시 말해서 컴퓨터 사용자들이 사회적인 맥락과는 별개의 존재로서 연구됐다.

하지만 90년대 초반이 되면서 학자들은 이러한 제한적인 사용자에 대한 관점의 확장을 요구한다(Shapiro et al, 1996). 특별히, 90년대는 인터넷의 본격적인 보급이 시작된 시기다. 그래서 이때부터 컴퓨터는 단순한 개인의 업무나 오락만을 위한 도구가 아니라, 다른 사람과 커

뮤니케이션할 수 있는 도구이며, 다른 이와 협동 작업을 하기 위한 도구로 인식되기 시작한다. 이런 점에서 HCI 연구에 있어서 사회적 이슈가 중요시되는 것은 당연한 결과라 할 수 있다. 90년대의 HCI 연구는 다음의 새로운 관점들이 중요시되기 시작했다.

21세기 이후: 인공지능과 메타버스의 시대

21세기가 되면서 인터넷 보급, 스마트폰의 탄생, 클라우드와 빅데이터의 시대를 겪게 된다. 그리고 이후, 또다시 4차 산업혁명의 시대가 도래하면서, 인공지능, 메타버스의 시대로 숨 막히게 넘어가고 있다. HCI는 이미 이 시대의 흐름에 맞게 변해 가고 있다. HCI와 AI의 결합, HCI와 가상현실/메타버스와의 결합, 이것은 현재 HCI의 큰 화두이다. 사용자의 의도, 사용자의 활동, 사용자의 니즈를 파악하는 연구가 AI 기술과 결부되어 빠르게 진행되고 있고, 단순한 도구의 차원을 넘어 거대한 가상공간으로서의 컴퓨터 사용자 연구 (김희철, 2007) 역시 메타버스의 도래와 함께 현재는 물론, 미래의 HCI 연구의 큰 흐름으로 자리 잡게 될 것이다.

1.4 사용성

‘왜 어떤 시스템은 자주 사용되는 것이고, 또 다른 어떤 시스템은 사용되지 않는 것인가?’ 우리는 이것이 궁금한 것이다. 이 문제를 우리는 **사용성(usability)의 문제**라고 말할 수 있다. HCI는 이 사용성을 핵심적으로 다루는 학문이다. HCI 연구 초창기에는 하나의 시스템이 사용성을 가지고 있다는 말은 이 시스템이 사용하기 편리하다는 것을 의미했다. 그러나 시간이 지나면서 사용성이라는 말은 더욱 폭넓은 개념으로 받아들여지게 되었고, 사용성이 있다고 말하는 사람마다 그 의미가 다른 경우가 비일비재하다.

이 절에서는 세 가지로 나누어 사용성의 의미를 생각해 보고자 한다: **인지적 사용성, 경험적 사용성, 사회적 사용성.**

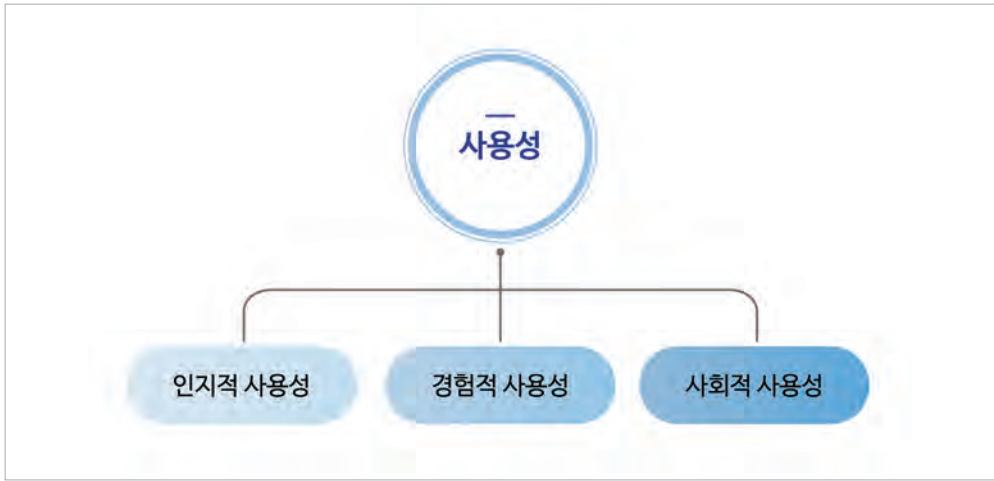


그림 7-4 사용성의 3가지 의미

인지적 사용성

인간의 인지적 능력 없이 도구의 사용은 불가능하다. 우리가 일반적으로 접해온 사용성, 즉 지금까지 HCI 관련 서적에서 주로 말해 온 사용성이 바로 여기서 논하는 인지적 사용성이다. 인지적 사용성은 다른 두 형태의 사용성의 기초가 된다고 볼 수 있다. 인지적 능력은 감성적 혹은 사회적 능력의 바탕이 되기 때문이다. 그런 의미에서 인지적 사용성은 가장 중요하고, 최우선적으로 이해되어야 한다. 인지적 능력과 관련되어 이해되는 사용성은 대략 다음과 같은 의미 또는 목표를 가진다.

첫째, 사용의 효율성(efficiency)이다. 편리하다는 말도 효율적이라는 말과 비슷한 의미로 생각해도 좋을 듯싶다. 예를 들어, 당연한 말이지만 명령어 방식의 인터페이스보다는 GUI 방식의 시각화된 인터페이스가 빨리 일을 수행할 수 있기 때문에 효율적이다. 우리의 직관과 일치하도록 인터페이스가 설계되어 있으면 이를 효율적 인터페이스라 말할 수 있다.

둘째, 학습의 용이성(learnability)이다. 매뉴얼을 읽어가면서 시스템을 사용하는 사람은 거의 없다. 사용법에 대해서는 쉽게 배울 수 있어야 한다. 사용자들은 배우는 데에 많은 시간을 투자할 의지가 거의 없다. 그리고 도움말 기능이나 온라인 튜토리얼 기능, 마법사 기능 등도 사용법에 대한 학습을 도울 수 있다.

셋째, 안전성(safety)이다. 기술은 때로는 위험할 수 있다. 원자로 폭발로 수많은 목숨을 앗

아가기도 한다. 이런 일이 발생하기 전에 이를 대비할 수 있는 시스템을 디자인할 수는 없을까? 사람은 기계가 아니기 때문에 주의를 집중할 수 없을 때, 피로할 때 예기치 않는 실수를 할 수 있다. 그리고 그 실수가 때로는 치명적이 될 수 있다. 시스템은 안전해야 한다. 피로도를 덜 느낄 수 있게 제작되어야 한다.

넷째, 기억의 용이성(memorability)이다. 규칙적인 간격으로 시스템을 사용하지 않는 한, 인간은 사용법을 다시 확실하게 기억해 내기 어렵다. 시스템 디자이너는 인간이 거의 기억하지 못한다는 사실을 알아야 한다. 그래서 이해하기 쉬운 아이콘이나 명령어, 기억에 도움을 줄 수 있는 행동의 순서, 의미 있는 그룹화 등에 대해 각별히 신경써야 한다.

경험적 사용성(사용자경험, UX)

인지적 사용성의 목표인 효율성이나 학습의 용이성 등은 상당히 합리적이고 이성적인 개념들이다. 하지만 사용자 경험이라는 용어는 말 그대로 ‘경험’이 강조된 개념이다. 사용자 경험론이 대두하기 시작한 데는 과거에는 상상할 수 없었던 다양한 기술들이 개발된 데 힘입은 바 크다. GUI 이전 시대의 컴퓨터는 몇몇 게임을 제외하고는 즐거움을 줄 수 있는 대상은 못되었다. 그러나 GUI의 대중화 이후 많은 변화가 일어났다. 우리의 삶과 떼어 수 없는 관계에 놓인 웹과 인터넷, 스마트폰은 물론, 가상현실, 정보가전, 다양한 멀티미디어 기술 등의 등장으로 컴퓨터를 통해 우리 인류가 즐거움을 느끼기 시작했다.

그래서 사용자 경험을 높이기 위한 시스템 디자인의 목표들은 분명하다. 사람들에게 기쁨을 주고, 만족을 주고, 심미적인 즐거움을 주고, 사용자의 사용 동기를 제공하고, 감성적인 기쁨을 주는 데에 있다. 이러한 목표들은 대개 인간이 어떻게 “느끼는가(feel)”의 문제와 관련이 된 것이다. 사용하기 쉬워야 한다는 인지적 사용성의 목적마저도 중요하지 않은 때도 있다. 예를 들어 사용하기 어려운 시스템은 사용자에게 새로운 경험을 제공할 수 있다(Frohlich and Murphy, 1999). 시스템은 흥미와 재미를 유발할 수 있는 것이 되면 좋다. 그리고 창조적인 일을 할 수 있도록 도와줄수록 좋다. 그리고 사용자에게 도전감을 제공해 줄 수도 있다. 이러한 모든 것들이 경험적 사용성을 제공하기 위한 목적들이 된다.



그림 7-5 경험적 사용성의 목표들

사회적 사용성

사회적 사용성이 높다는 것은 무엇을 의미할까? 다양한 의미를 생각할 수 있지만 한 마디로 말한다면, 사회적인 어떤 영향력 때문에 많은 사람이 시스템 (혹은 시스템 상의 특정 기능)을 사용하고 있다면, 이 시스템은 사회적인 사용성(social usability)이 높다고 할 수 있다. 여기서는 사회적 사용성을 다룰 때, 정치적 경제적 문화적 의미의 사용성에 대해서 주로 생각해 보고자 한다.

- **정치적 사용성(political usability):** 원격의료(telemedicine) 시스템은 매우 정치적이다. 원격의료의 기본 취지는 훌륭하다. 섬이나 오지 등 의료 시설이 미비한 곳에 사는 사람들을 도울 수 있다는 점은 인도주의적 차원에서라도 의미가 있다. 또한 항상 병원에 갈 필요 없이 간단한 것은 집에서 검사를 받는 것도 좋아 보인다. 하지만 원격의료 시스템의 도입은 각 나라와 사회의 서로 다른 그룹들 사이의 힘에 의해 좌우될 수 있다. 인도나 호주에서 원격의료는 합법이다. 하지만 우리나라에서는 현재 의사들의 부정적인 시각과 함께 원격의료는 불법이다.

인간은 자기 보호나 자신의 능력이나 영향력의 신장 그리고 일을 분담하는 과정 속에서 불평등이 생기고, 이 때문에 정치적인 힘은 필연적으로 발생한다. 누구의 힘이 더 강한가에 따라 그 강한 쪽에 유익이 되는 시스템은 정치적 사용성이 높아지게 된다. 현재 HCI 연구자들 사이에는 이러한 정치적 사용성(political

usability) 문제에는 그다지 많은 관심을 보이지 않고 있다. 하지만 정치적 사용성은 우리의 현실과 밀접한 관계가 있다.

- **경제적 사용성(economic usability):** 사람들의 구매에는 가격이 중요할 때가 있다. 어떤 때는 싸야 구매할 수 있지만, 보석의 경우는 비싸기 때문에 가치 있는 것으로 보고 이를 구매했다. 가격이 인간의 심리에 미치는 영향은 매우 크다. 가격을 어떻게 책정할 것인가의 문제는 쉬운 일이 아니다. 가격만이 아니다. 회사나 제품의 이미지 혹은 위상 정립(positioning)의 문제는 마케팅 분야에서 매우 중요한 문제이다. 80년대 매킨토시는 어느 제품보다도 우수한 제품이었다. 이에 반해 IBM PC는 배우기 어렵고 복잡했다. 하지만 매킨토시는 예술가나 학자 등 창조적인 소수를 위해 만들어졌고, IBM은 다수를 위한 산업 사회의 요구를 충실히 반영했다. 매킨토시는 GUI로 인한 인지적 사용성을 높였으나, IBM PC는 가정 직장, 학교 등 어디에서든 필요한 존재로 자신에 대한 위상을 정립시켜 나간 결과, 가격은 물론 위상정립의 차원에서 경제적 사용성을 높였다.

- **문화적 사용성(cultural usability):** 문화는 생각과 행동을 지배한다. 자동차가 처음 등장했을 때, 우리나라의 많은 사람들은 이를 위험한 기계로 여겼다고 한다. 사람을 다치게 하는 것을 보니 더욱 그런 생각이 굳어졌을지도 모른다. 자동차에 대한 거부 반응이나 이에 준한 행동들은 하나의 문화적 산물이다. 나이 든 어른들이 텍스트 채팅을 잘 하지 않는 것은 그들의 무능함이나 인지적 능력의 부족 때문이 아니다. 그 세대에는 텍스트 메시지를 주고받는 것이 문화로 정착되지 못했기 때문이다. 문화가 형성되었다는 것은 가치나 인식 등에서 어떤 일관적 패턴이 생성되어 있다는 것을 의미한다.

서로 다른 문화는 사용성을 평가하는 하나의 중요한 기준이 된다. 하나의 시스템도 어떤 문화에서는 잘 사용될 수 있지만 다른 문화에서는 그렇지 못하다. 전자의 경우를 문화적 사용성이 높다고 하고, 후자의 경우를 문화적 사용성이 낮다고 부른다.

조선 말기 우리나라 양반은 선교사들의 테니스 치는 광경을 보고 “저렇게 힘든 일을 하인에게 시키지 왜 자기가 하느냐?” 라고 의아해했다고 한다. 양반문화에서는 양반이 테니스 라켓을 잡을 이유가 없었다. 서양의 문화가 되어야 라켓을 사용할 수 있는 것이다. 카카오톡을 사용하는 것은 카카오톡이 다른 어떤 채팅 시스템보다 편리해서만은 아니다. 카톡 문화가 정착되었기에 가능한 것이다. 문화적 사용성의 핵심은 문화가 기술, 특별히 컴퓨터 기술의 사용과 관련하여 어떤 영향을 미치는가의 문제에 있다. 인지적 능력보다도 문화적 영향력이 사용성 문제에 있어 훨씬 더 큰 결정 요소가 되는 경우가 많다.

2. 인간 로봇 상호작용

HRI(Human Robot Interaction)는 로봇 시스템에 대한 이해는 물론, 로봇과 인간과의 상호작용에 대한 이해 및 설계, 평가를 다루는 연구 분야이다. HCI가 학문으로 1980년대 초반에 성립되었다면(Card et. al. 1983), HRI는 HCI 소개 10여 년 후인 1990년대 후반에 개념화되기

시작한 학문 분야이다.

인간과 로봇의 상호작용(Human Robot Interaction, HRI) 혹은 인간-로봇 소통(Communication)은 로봇이 가정, 산업 현장에서 인간과 점점 친밀히, 경우에 따라서 협업까지 하게 되는 상황들이 생기면서 매우 중요한 연구 영역이 되어가고 있다. 특히 최근 로봇의 능동적인 소통 방식들이 소개되고 있는데, 소프트뱅크의 페퍼(Pepper)나 타임지의 표지 모델이 되기도 했던 MIT의 지보(JIBO)와 같은 로봇들이 소셜 로봇이란 이름으로 소개되고 우리의 주목을 받기 시작했다. 아울러 인간과 로봇이 가까워지면서 점점 감성 로봇이 차지하는 비중도 늘어날 전망이다(김평수, 2016). 이처럼 인간과 로봇의 공존이 마치 인간과 인간이 같이 살아가듯이 점점 자연스러워지면서, HRI는 미래의 가장 유망한 로봇 시스템의 연구 분야라 할 수 있다(권동수 & 이강우, 2005).



그림 7-6 소셜 로봇 Jibo (<https://robots.ieee.org/robots/jibo/>)

2.1 HRI의 정의

일반적으로 HRI는 인간, 로봇, 그리고 각 개체가 서로 영향을 주는 방식에 대한 연구라고 정의할 수 있으며, 이 정의에 따르면, HRI 연구는 최소한 3가지의 연구대상들(인간, 로봇, 개체들 간의 상호작용)을 포함하는 폭넓은 연구 분야라 할 수 있다(권동수 & 이강우, 2005).

특별히, AI 시대의 도래와 함께, 지능형 인터페이스가 강조될 때, HRI는 로봇이 사용자 인

간의 의도를 판단함으로써 상황에 맞는 적합한 반응과 행동을 계획, 수행하여 원활한 의사소통 및 상호협력을 실행하게 하는 모든 기술을 뜻하며, 로봇 인간 상호작용에 일어나는 로봇의 인식(perception)-판단(Cognition)-표현(Expression)의 3단계 기술을 포함한 기술을 의미한다(이상무, 2011; 박천수 et. al., 2013).



그림 7-7 HRI 기술 구성도 (박천수 et. al. (2013), p. 87)

인식기술

모든 행동과 반응의 출발은 인식(perception)에서 비롯된다. 누군가와 대화할 때, 그 사람이 앞에 있는 것을 인식했기에 대화를 할 수 있다. 화재가 났다는 것을 시각 혹은 청각이나 촉각을 통해 인식할 때, 화재를 피해 대피하는 행동을 할 수 있다. 물을 마시기 위해서는 컵 속에 물이 있는 컵이 바로 앞에 있는 것을 인식해야 한다. 자동차 경적 소리를 인식할 때, 이 소리에 반응할 수 있게 된다. 인간이 그런 것처럼 로봇도 판단과 행동을 하기 위해서는 먼저 인식을 할 줄 알아야 한다. 그런 점에서 인식 기술은 HRI 기술에서 가장 최우선적으로 해결해야 할 근간이 되는 기술이다.

따라서 인식 기술은 인간의 오감을 흉내 내는 기술이라 생각해도 무방하다. 무엇보다 오

감, 시각, 청각을 통한 인식 기술은 매우 중요한 기술이다. 시각 인식을 위해서는 이미지 센서, 적외선 센서, 열 감지 센서 등이 활용되어야 한다. 대표적인 인식 기술로 물체 인식, 얼굴 인식, 표정 인식, 동작 인식, 행동 인식, 제스처 인식 등의 기술이 있다. 청각 인식과 관련해서는 음성 인식, 음색 인식 등을 들 수 있다.

판단기술

판단 기술은 로봇이 인식 기술을 통해 인식하게 된 객체, 상황 등의 지각 정보를 기반으로 상호작용 상황과 인간의 의도를 파악하고, 표현과 행위를 계획하는 기술을 뜻한다. 따라서, 판단 기술은 전통적인 AI 연구인 지식 표현과 추론, 계획 등과 관련된 기술들이 요구될 때가 많다.

판단 기술의 전단계인 인식 기술의 경우, 최근에는 딥러닝과 신경망 기술 등을 통해 구현되는 경우가 점점 증가하고 있는데, 이는 이러한 연결주의적 접근법이 물체 인식을 포함한 패턴 인식에 매우 뛰어난 인식률을 제공할 뿐 아니라, 보다 더 쉽게 구현될 수 있는 장점을 지니고 있기 때문이다. 하지만 추론과 문제 해결, 계획 등의 지능 활동을 요구하는 판단 기술의 경우는 AI의 기호주의적 접근법을 통해 구현되는 경우가 많다. 물론 감정 상태 인식이나 상황 예측 기술 등에 딥러닝을 포함한 연결주의적 방법이 부분적으로 사용될 수 있지만, 판단 기술의 경우, 설명 가능한 AI 기술이 요구되는 경우가 많아 기호주의적 접근 방법이 사용되는 것이 일반적이다.

표현기술

인간도 똑같은 내용에 대해서 어떤 형식으로 표현하느냐에 따라 전달하는 내용이 효과적으로 혹은 다르게 전달, 해석될 수 있다. 의사 전달을 할 때, 얼굴 표정과 말하는 방식이 중요하듯이, 로봇의 표현 기술도 중요하다. 인간은 언어적 표현, 즉 말과 글로 의사 전달을 하지만 다른 한 편으로는 제스처, 표정, 억양 등 비언어적 수단을 통해 의미를 전달하기도 한다. 로봇의 얼굴과 행동을 통해 뜻을 전달하려 할 때는 자연스런 표정을 생성하기 위해서 그리고 자연스런 몸동작을 위해서 높은 자유도를 활용한 표현 기술에 대한 연구가 필요하다. 말을 하는 로봇의 경우에는 자연스런 TTS(Text-To-Speech) 기술과 음향을 통한 표현 기술이 연구되어야 한다.

2.2 HRI를 위한 지능형 인터페이스

HCI 기술은 사용자에게 편리함을 제공하기 위한 GUI 기술, 사용성을 증진하기 위한 기술, 커뮤니케이션을 돕는 소셜 컴퓨팅 기술 등이 중요하며, 이러한 기술은 HRI에서도 매우 중요한 기술인 것은 분명하다. 하지만 HRI 기술은 이러한 기술 위에, 지능형 인터페이스 기술, AI 기술이 부과될 때 진정한 HRI 기술로의 역할을 하게 된다. 즉, HRI는 HCI와 달리 AI 기술이 더욱 강조되어야 한다.

우리가 컴퓨터를 편리하게 사용하기를 위해서는 GUI 기술이 중요하지만 음성 인식과 같은 지능형 인터페이스 기술이 꼭 필요한 기술은 아니었다. 실제로, 딥러닝과 같은 AI 기술의 발전 없이도 HCI라는 학문이 큰 학문 영역으로 자리 잡는 데에 아무런 문제가 없었다. HCI 기술은 근본적으로 인지심리학, 사회학, 디자인 등의 학문 영역을 필요로 했지만, 지능형 컴퓨터라기보다는 그저 편리한 시스템을 만들어 주면 되었다. HCI에서는 AI가 필수적인 것은 아니었다. 하지만 HRI는 이와는 다르다.

HRI에는 상호작용을 위한 편리함뿐 아니라 지능이 더욱 필요하다. 인식할 줄 아는 지능, 판단할 줄 아는 지능, 표현할 수 있는 지능이 필요한 것이다. 내 앞의 로봇과 소통하고 교감을 갖는다고 가정해 보자. 만약 로봇이 내 말귀를 못 알아먹고 내가 누군지도 모른다면 로봇과 소통할 수 있겠는가? 당연히 불가능하다. HRI가 지금껏 HCI라는 영역에 비해 큰 학문적, 산업적 영향력을 미치지 못한 것은 사실이며, 그 주된 이유는 HRI 기술을 뒷받침할 AI 기술의 발전과 관심이 미미했기 때문이라 할 수 있다.

이런 점에서 HRI의 핵심 기술은 AI 기술이라고 보아도 무방하다. 이는 HCI의 핵심 기술과는 사뭇 다른 측면이라 할 수 있다. 이런 측면을 반영하면서, 본 절에서는 HRI의 지능형 인터페이스 기술에 대해 초점을 맞추어 HRI 기술을 설명하고자 한다. 그렇다고 해서 앞에서 언급했듯이 HRI 기술이 HCI 근간 기술들 및 연구 방법들과 무관하다는 뜻은 결코 아니다. 오히려 모든 HCI 이론과 기술을 100% 필요로 하는, HCI에 뿌리를 두고 있는 학문이 HRI인 것이다.

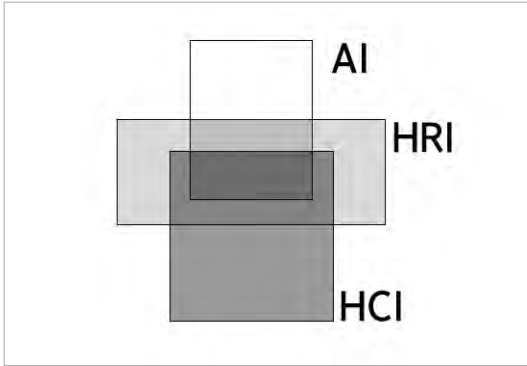


그림 7-8 AI, HCI, HRI의 관계도

로봇 비전 기술

로봇 비전은 로봇 공학 및 자동화 분야에서 최근에 가장 많이 발전하고 있는 분야 중 하나이다. 한 마디로, 로봇 비전은 로봇에게 눈을 달아 주는 기술이라 보면 된다. 물체를 잘 인식하고, 탐색하고, 때로는 물체를 찾아가는 것과 공장의 불량률 검사하는 등 다양한 목적으로 사용하는 기술이다. 카메라/이미지 센서, 적외선 센서, 온도 센서 등을 활용해서 객체의 존재 여부나 위치 등을 파악해야 하는 매우 정교한 기술이다. 근간이 되는 AI 기술은 패턴 인식 기술이며, 패턴 인식 기술은 기본적으로 기계학습 기술을 통해 구현되는 경우가 많다. 이러한 패턴 인식과 기계학습 기술은 로봇 비전 기술 실현을 위한 기반 AI 기술이다.

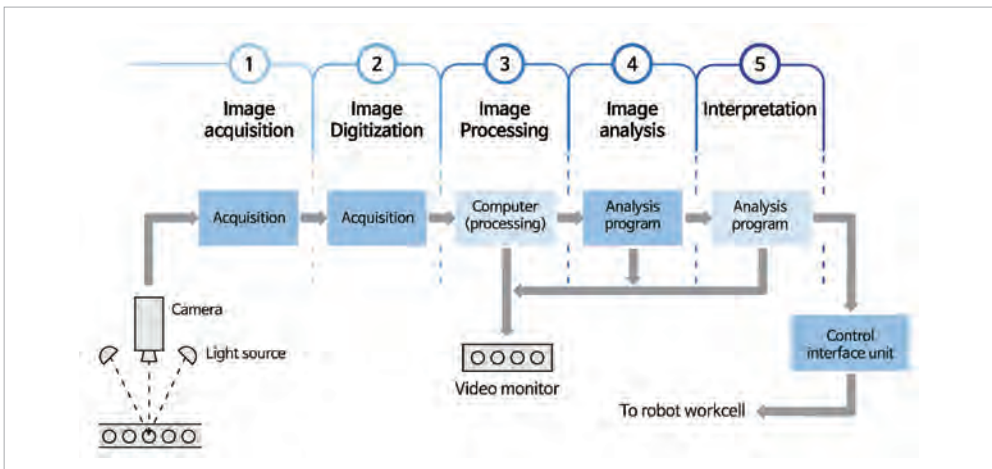


그림 7-9 로봇 비전의 5단계 처리 과정 (http://www.aistudy.co.kr/robot/vision_keramas.htm)

로봇 비전 혹은 머신 비전은 영상으로부터 객체를 추출하는 것이 주요 목표인데, 크게 5 단계의 처리 과정을 거친다. 1단계는 **영상 획득(image acquisition)** 단계로, 여기서는 카메라나 이미지 센서로부터 연속적 형태의 영상을 획득한다.

2단계에서는 획득 영상에 대해 2차원 배열의 디지털 형태로 만든다. 이것이 **영상 디지털화(image digitalization)** 단계이다. 샘플링과 양자화 기능을 통해 영상들을 디지털화하는데, 샘플링은 연속적인 아날로그 영상 데이터에서 일정 간격의 유한 개의 영상 데이터를 취하는 과정을 뜻하며, 양자화는 샘플링된 데이터의 실수 값을 표현 가능한 이진수로 변환하는 기능이다. 이렇게 샘플링과 양자화가 끝나게 되면 영상은 디지털화되었다고 할 수 있다.

3단계에서는 **영상 처리(image processing)**를 하게 되는데 영상의 변환 기술이며, 잡음 제거, 영상 향상(enhancement), 영상 압축, 영상 보정 등이 있다. 흔히 영상 분석 전에 행해지는 전처리 과정(preprocessing)이 필요하다고 말하는데, 3단계의 영상 처리와 곧 소개할 4단계 영상 분석을 포함한 과정을 뜻한다.

4단계는 **영상 분석(image analysis)** 단계로, 영상 내의 관심 영역(region of interest, ROI)을 정의하고 이를 분리하는 세그멘테이션(segmentation)이 대표적인 기술이다. 예를 들어 의료 영상 이미지에서 암세포만을 따로 분리하여 그 암세포가 몇 개 있는지를 알 수 있게 만들 수 있다. 4단계에서 또 하나의 중요한 기술이 특징 추출(feature extraction)이다. 이는 대개 기계학습을 하기 위한 바로 직전 단계에서 수행되는 최종 전처리 단계라 할 수 있다. 예를 들어 얼굴 사진을 놓고, 얼굴의 형태, 얼굴의 색 등과 같은 특징들 및 이들의 값을 구하는 단계이다.

5단계는 4단계의 특징 추출까지 이루어진 이후, 특징들의 값을 활용하여 객체 혹은 물체의 인식이 이루어지는 **영상 해석(image interpretation)** 단계이다. 한 개 이상의 특징을 컴퓨터 메모리에 저장된 모델 또는 템플릿의 해당 특징과 비교하는 템플릿 매칭(template matching)이나 특징의 중요도에 따른 가중치를 두어 객체를 판별하는 특징 웨이팅(feature weighting)과 같은 방법이 사용되며, 다양한 기계학습의 분류기(classifiers)들이 사용된다. 사진을 보고 이 사진의 객체가 인간인지 고양이인지 등의 최종 분류는 5단계에서 일어난다. 알아야 할 것은 4단계까지는 전처리, 혹은 신호처리 단계, 즉 AI 활용의 전 단계라 한다면, 5단계는 진정한 의미의 AI, 특별히 기계학습이 이루어지는 단계라 할 수 있다.

로봇 비전 기술은 다양한 기술들을 포함하는데, 얼굴 인식, 휴먼 인식, 제스처 인식 등 영상 인식 분야는 물론, 로봇 인간 상호작용을 비롯하여 자율 주행 로봇의 내비게이션, 비디오 모니터링과 활동 감지 등 매우 다양한 분야에 적용된다. 로봇 비전이 가장 많이 활용되고 있는 분야는 비전 검사(vision inspection)로 이는 산업 제조 현장에서의 불량 검출, 비정형적인 이물, 훼손, 크랙, 얼룩 검출 등을 하여 양품 생산의 효과를 극대화하게 하고 있다.

음성 인식, 자연어처리

위키피디아에 소개된 대로, 음성 인식(音聲認識, Speech Recognition)이란 사람이 말하는 음성 언어를 컴퓨터가 해석해 그 내용을 문자 데이터로 전환하는 처리를 말한다. STT(Speech-to-Text)라고도 한다. 1970년대 이후 연구되어 온 음성 인식 기술은 오랜 기간 실용화되지 않은 실험실의 기술로 남아있다가 ARS 서비스에 2010년 전후해서야 뒤늦게 상용화되기 시작했을 만큼 매우 어려운 기술로 알려져 왔다. 하지만 최근 딥러닝을 활용한 음성 인식의 정확도가 극적으로 향상되면서, 음성 인식은 이제 난공불락의 기술이 아닌, 우리의 삶 속에 가까이 오게 된 기술, 즉 활용 가능한 기술로 자리 잡게 되었다. AI 스피커의 등장과 상용화가 이를 증명하는 대표적인 예라 할 수 있다.

음성 인식 기술이 어려웠던 이유는 근본적으로 음성 신호 자체의 해석이 영상 데이터 해석과 달리 매우 어려웠다는 데에 있었다. 더욱이 음성뿐 아니라 음성 신호는 대개 잡음과 함께 타인의 소리, 에코 등 한 사람의 음성 신호에 간섭하는 다른 신호가 너무 많다는 데에도 그 어려움의 원인이 있었다. 은닉 마르코프 모델을 활용한 음성 인식 기술이 상용화되기까지 40년 이상의 기나긴 연구 기간이 필요했을 만큼 연구자들에게는 악명이 높은 기술이 음성 인식 기술이었지만, 영상에서와 마찬가지로 딥러닝의 소개는 음성 인식 기술 혁신을 위한 단비와도 같았다. 아울러 아마존 AI 스피커에서 1개가 아닌 7개의 마이크를 사용하게 되면서 원거리 음성의 인식률을 급격히 향상시키게 되어 음성 인식은 이제 어렵지 않은 기술로 다양한 응용 영역에 들어갈 수 있게 되었다. 이제 음성 인식의 가용성은 HRI 기술을 위해 사용될 주요 기술로 자리매김할 수 있게 만들었다.

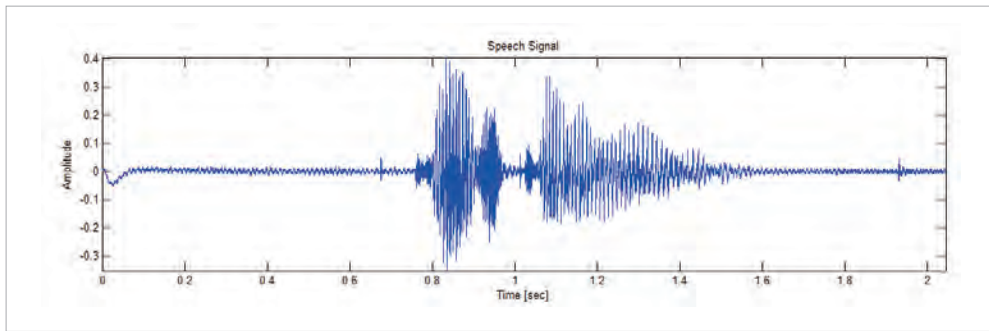


그림 7-10 음성 신호 파형 (<https://oasiz.tistory.com/175>)

음성 인식 기술과 더불어 HRI 기술을 위해서는 음성합성(音聲合成, speech synthesis) 기술이 요구된다. 음성 인식 기술을 STT(Speech-to-Text) 기술이라 한다면, 음성합성은 반대로 TTS(Text-to-Speech) 기술이 된다. 즉, 위키피디아에서 설명한 바와 같이, 말소리의 음파를 기계가 자동으로 만들어 내는 기술로, 간단히 말하면 모델로 선정된 한 사람의 말소리를 녹음하여 일정한 음성 단위로 분할한 다음, 부호를 붙여 합성기에 입력하였다가 지시에 따라 필요한 음성 단위만을 다시 합쳐 말소리를 인위로 만들어내는 기술을 뜻한다. 그림 7-11에서 보는 바와 같이 문자를 음성으로 만드는 기술인데, 여기에서 핵심 기술은 만들어진 음성이 얼마나 자연스럽게 들리게 할 수 있느냐에 달려 있다. 음성 합성에서의 중요한 기술은 음편(unit) DB에 저장된 수많은 음편들 중에서 만들고자 하는 최적의 음편 선택 기술과 전체 발화에 적합한 음편들을 부드럽게 이어 붙이는 기술이다. USS(Unit Selection Synthesis) 합성기의 경우, 방대한 음편 코퍼스를 그대로 사용하는 유닛 연결 방법으로, 원음 그대로 사용하는 데서 오는 자연스럽게 좋은 음질을 제공할 수 있다.



그림 7-11 음성 합성 (<http://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=93221>)

마지막으로 **자연어 처리(natural language processing)** 기술은 일상에서 사용하는 언어를 뜻하는 자연어의 의미를 컴퓨터가 분석하고 이해할 수 있는 기술을 가리키며, 자연어 처리가 되는 순간 진정한 의미의 인공지능이 탄생했다고 볼 수 있다. 자연어 처리 기술은 딥러닝 이전과 딥러닝 이후로 나누어 생각해도 무방할 정도로 딥러닝의 영향력이 절대적이다.

딥러닝 이전의 자연어 처리는 전통적으로 규칙 기반의 자연어 이해, 통계 기반의 자연어 이해 기술을 바탕으로 연구됐으나, 실용화하기에는 역부족인 태생적, 구조적 한계를 지니고 있었다. 무엇보다도 이러한 고전적인 방식은 변화하고 진화하는 언어의 세계를 반영하는 유연성과 확장성 측면에서 떨어지는 약점을 지니고 있다.

하지만 딥러닝 이후 자연어 처리에서는, 문법 중심의 자연어 처리와는 달리, 발달한 SNS 문화 등의 영향으로 방대한 문장들에 대한 수집이 가능해졌고, 이들 거대한 말뭉치 코퍼스 데이터가 있을 경우, 이들 데이터를 학습한 학습 중심의 자연어 이해가 가능해졌다. 이에 따라 놀라운 변화가 일어나 기계 번역은 이제 우리의 생활 속에 매우 자연스런 번역을 이룰 수 있게 되었다. 딥러닝 방식은 임베딩(embedding) 방식, 즉 우리의 언어를 수치화하는, 벡터화하는 기술과 함께 사용하여 실제 인간과 초보 수준의 대화가 가능한 자연어 처리 기술을 확보하게 되었다. 무엇보다도 이미 학습된 딥러닝 구조를 그대로 사용하여 적은 수의 문장 데이터를 활용하여 자연어 처리를 극대화할 수 있는 전이학습(Transfer Learning) 방식을 사용함으로 더욱 진일보한 자연어 처리 방법을 지니게 되었다.

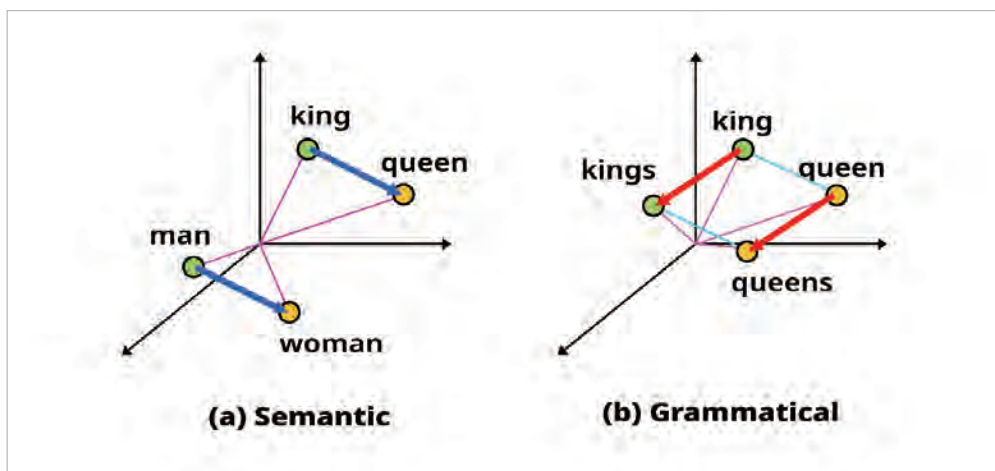


그림 7-12 단어 임베딩: 단어 벡터의 의미론적 / 문법적 관계 (강형석, 양장훈 (2018), p. 2001)

HRI를 위한 AI 기술

지금까지 로봇 비전과 음성 인식, 자연어 처리 등의 지능형 인터페이스 관련 AI 기술에 대해서 살펴보았다. 하지만 HRI에서 다룰 AI 기술은 이러한 인식 기술에 국한되어서는 안 된다. 전통적 AI 연구 주제들인 문제 해결과 계획, 휴리스틱, 지식 표현, 추론, 지식 습득, 불확실성 처리 등이 또한 HRI 분야 각 영역에서 심도 있게 다루어져야 한다. 지식을 습득, 표현, 처리하는 연구, 즉 추론하고 판단하는 기술에 대한 연구가 로봇의 세계에서 잘 이루어져야 한다. 아울러 말뿐 아니라 얼굴의 표정을 섬세한 사람의 표정처럼 만드는 표현 기술도 HRI 연구에서 흥미로운 AI 연구일 것이다. 무엇보다도 휴머노이드 로봇이 있는데, 이는 실제 사람처럼 걷고 뛰고 움직일 줄 아는 **동작성 지능**이 뛰어난 로봇이다. 물론 동작성 지능은 **인지적 지능**이 기반이 되어야 함은 물론이지만, 동작성 지능, 즉 걷고 뛰고 점프하고 회전하고 물건을 잡고 들 줄 아는 동작 기술에 대한 연구도 HRI에서는 필수적이다.

현대자동차가 인수한 보스턴 다이내믹스의 Atlas나 SpotMini와 같은 로봇은 2족과 4족으로 계단과 언덕도 기어오르고 평지를 뛰기도 하는 모습을 보임으로써 세상을 놀라게 만들었다. 미래에는 이러한 동작성 지능 부여에 대한 HRI 연구도 매우 활발히 진행될 것으로 예견된다.



그림 7-13 보스턴 다이내믹스의 Atlas(左)와 SpotMini(右)

(<https://www.therobotreport.com/boston-dynamics-atlas-jog-spotmini-navigate/>)

참고문헌

- [1] 강형석, 양장훈 (2018) “한국어 단어 임베딩 모델의 평가에 적합한 유추 검사 세트”, 디지털콘텐츠학회논문지 Vol. 19, No. 10, pp. 1999-2008
- [2] 권동수, 이강우 (2005): “인간-로봇 상호작용연구; 인간과 로봇 의 새로운 공존을 위하여”, 로봇공학회지 제 2 권, 제 3 호, pp. 5-8.
- [3] 김평수 (2016): “인간과 교감하는 감성로봇 관련 기술 및 개발 동향.” 한국통신학회지 33, no. 8 (2016): 19-27.
- [4] 김희철 (2005): 인간과 컴퓨터의 상호작용: 인컴학을 향하여. 사이텍미디어
- [5] 김희철 (2007): “Aspiring for a virtual life”, [International Conference on Human-Computer Interaction](#), pp 615-623
- [6] 박천수, 장민수, 이동욱, 김재홍 (2013): 인간과 로봇의 상호작용을 위한 판단·표현기술 동향 (Cognition·Expression Technology Trend for Human and Robot Interaction). 한국전자통신연구원, 전자통 신동향분석, Vol. 28, No. 4, 2013년 8월, pp. 86~96
- [7] 이상무 (2011): “인간로봇상호작용(HRI) 기술의 현황과 발전 방향”, KEIT, VOL. 11-8.
- [8] ACM/SIGCHI (1992): Curricular for Human Computer Interaction, Chapter 2.
- [9] Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A. (1983): The Psychology of Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale, New Jersey. London.
- [10] Frohlich, D. and Murphy, R. (1999): Getting physical: what is fun computing in tangible form? Computers and Fun 2, Workshop, 20 Dec. York, UK.
- [11] Kapor, M. (1996): A software design manifesto. In Bringing Design to Software. Edited by Winograd, T. ACM Press, pp. 1-9.
- [12] Kling, R. (1993): “Organization analysis in computer science”, The Information Society, 9(2)
- [13] Pressman, R. S. (2004): Software Engineering - A Practitioner's Approach. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 6th ed.
- [14] Shapiro, D. Tauber, M. and Traunmuller R. (eds.) (1996): The Design of Computer Supported Cooperative Work and Groupware Systems. Elsevier.

8

융합안전기술



기술의 발달이 가속화되면서 우리의 생활도 예전에 누리지 못하는 편리함을 누리게 된 반면, 환경이나 인류에게 가해지는 일상의 위협도 커지게 되었다. 예를 들면 프레온가스라 불리는 CFC(염화불화탄소)를 기반으로 한 냉매는 매우 우수한 성능을 지녀서 2000년까지 사용되었으나, 너무도 안정되어서 지구상에 오래 존재하며 소멸되지 않았다. 이들이 오존층까지 퍼져서 오존층을 파괴하며 오존층 고유의 기능인 태양으로부터의 자외선 차단효과를 급감시키는 결과를 초래하여 마침내 금지물질로 지정되기에 이르렀다.

사용이 편리하여서 가스를 연료로 널리 사용하고 있으나 자동차의 예를 들어 보면 휘발유나 경유는 상압에서 사용하므로 압력에 의한 위험은 없는 반면, LPG는 4기압 정도로 연료탱크가 받는 압력이 연료가 가득 찼을 때와 비었을 때가 4기압 정도의 차이가 난다. 요즘 많이 운행되는 천연가스 버스인 CNG(압축천연가스) 연료 차량은 연료탱크가 받는 압력이 260기압 정도 차이가 나서 연료탱크 제작을 비롯한 관련 설비에서 LPG와 비교할 수 없을 정도의 내압 기술이 요구된다. 운행 초기의 많은 사고 원인이 연료탱크 문제인 점을 감안하면 LPG 연료탱크의 제작 연장선상에서 CNG 용기를 생산하는 것은 매우 위험한 발상이다. 이를 조금만 확대하여 수소저장압력이 700기압인 점을 감안하면 이 또한 기술의 발달이 안전 확보와 불가분의 관계임을 알 수 있다.

로봇도 산업체에 도입될 경우 매우 큰 순기능이 있으나 이로 인한 위험성 역시 그 이상으로 커져서 이에 대한 보다 철저한 대비가 필요하다.

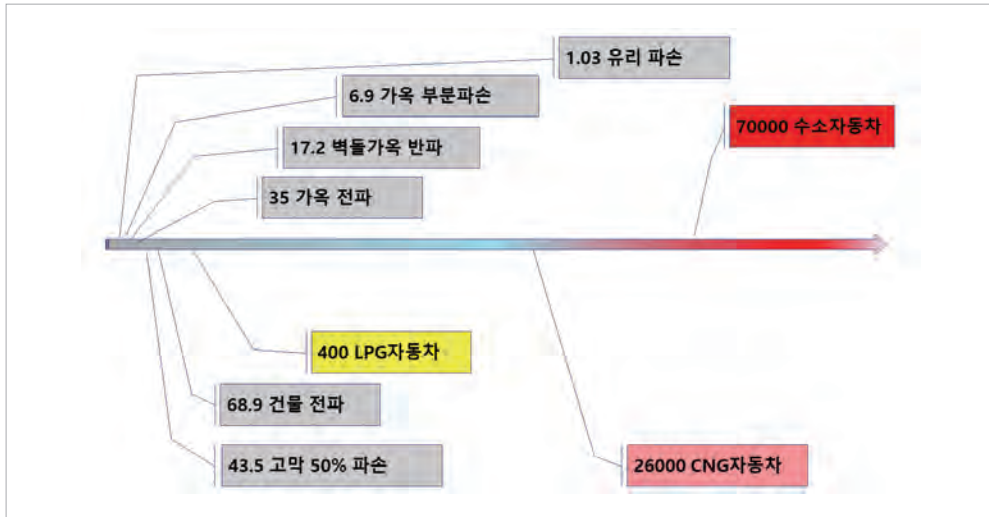


그림 8-1 연료가스 저장 압력과 압력에 따른 예상 사고 결과 [1]

안전은 대표적인 공공재로서 이른바 투자회임기간(Induction period)이 매우 긴 특징과 여러 분야에 걸친 전문성이 결합되어야 효과적인 해결책을 마련할 수 있는 분야이다. 가스안전을 예로 들어보면 모든 분야의 안전이 그렇듯이 관련 법규와 표준 등이 매우 중요하다. 가스안전을 담당하는 한국가스안전공사 업무의 절반 정도는 기준, 검사 지원, 시험 검사 등을 포함한 법규와 공익적인 내용이다. 이 밖에도 화공, 기계, 전기, 재료/소재, 컴퓨터, 토목, 산업공학 등을 전공한 엔지니어들이 복합적인 문제 해결을 위하여 힘을 합치고 있다. 우리나라의 대표적인 안전관리기관인 안전보건공단の場合에도 앞의 전공자들이 주된 구성원으로서 안전이 전형적인 융합 분야임을 나타내고 있다.

1. 안전 기술

안전을 인도주의적 측면에서 보면 인명 중시며 사회적 측면에서는 사회복지 및 환경보전을 들 수 있고 경제적 측면에서는 비용절감, 생산성 및 품질 향상, 근로자의 사기 진작 및 신뢰성 향상 등을 들 수 있다. 미국 심리학자인 매슬로우(Abraham Maslow, 1908)에 의하면 인간의 욕구는 그림 8-2에서처럼 단계적으로 표현되며 피라미드의 맨 아래층은 생존을 위해

필요한 생리적 욕구이고 다음으로 두 번째 층인 안전의 욕구가 있어서 안전은 인간의 가장 기본적인 욕구로 볼 수 있다.



그림 8-2 매슬로우의 인간 욕구 [1]

하인리히는 1931년 약 7만 5,000건의 사고를 분석하여 ‘도미노 이론’을 발표했다. 하인리히의 도미노 이론은 재해의 발생 과정을 근로자를 중심으로 5단계의 연쇄적 관계로 설명한 것으로 그간 안전 분야에서 널리 활용되어왔다. 하인리히의 5단계는 ‘1. 사회적 환경과 유전적 요소, 2. 개인적 결함, 3. 직접 원인(불안전한 상태, 행동), 4. 사고, 5. 재해’이다. 사회적인 환경과 근로자 개인의 유전적 요소가 기초 원인으로 작용해 근로자 개인의 개성적 결함으로 나타나 사고 발생의 간접적 원인으로 작용한다. 이러한 간접적 원인이 사고 발생의 직접적 원인이 되는 불안정한 상태와 불안정한 행동을 유발하게 돼 결국 사고와 재해의 연쇄 고리로 이어진다는 분석이다. 이 중 직접 원인을 분석한 결과 불안전 행동, 물적 요인 10%, 인적 요인 88%, 간접(환경) 요인 2% 정도로 그 원인이 있다고 보았다.

하인리히는 근로자 개인을 중심으로 사고의 연쇄적인 고리를 설명했고 사고의 ‘직접 원인’을 제거해 재해를 예방하는 방법을 제시했다. 안전관리를 통해 불안정한 상태를 개선하고 안전교육을 통해 불안정한 행동을 제거하는 형태로 사고를 예방하는 방법을 강조했던 것이다. 다음 그림 8-3에서 보듯이 비록 유전적 요소나 사회환경, 혹은 개인적인 결함이 있어

도 불안정한 행동이나 상태를 체계적으로 제거함으로써 사고를 미연에 방지할 수 있다는 점이다.



그림 8-3 도미노 이론에 의한 사고예방 방법 [1]

이 밖에도 하인리히는 산업안전의 4원칙을 밝혔는데 첫째는 원인연계의 원칙으로서 사고에는 반드시 원인이 존재한다는 것이다. 다음은 손실우연의 원칙으로서 사고 당시 조건에 따라 손실 여부 및 대소 결과가 다르다는 것이며 이를 통계적으로 1건의 큰 사고가 발생하면 통상 29건의 자살한 사고와 300건의 앗차사고가 있다는 점이다(1/29/300 법칙). 다음은 예방가능의 원칙으로서 모든 사고는 예방이 가능하다는 점으로, 전체 사고에서 천재(天災)는 2%에 불과하며 98%가 인재(人災)임을 밝혔다. 마지막은 대책선정의 원칙으로서 사고예방을 위한 대책을 선정, 적용하여야 한다는 점이다.

재해비용은 물적손실과 인적손실로 나눌 수 있으며 물적손실은 설비, 기계기구 등 재산상의 손실을, 인적손실은 근로자의 부상, 사망 등으로 인한 근로손실을 이르는 말이다. 또한 직접손실과 간접손실로 나누기도 하며 직접손실에는 휴업보상비, 장해보상비, 요양보상비, 장의비, 유족보상비 등이 있고, 간접손실에는 원료 및 제품 손실, 장치 설비 피해, 생산지체 중단에 따른 손실이 있다. 하인리히는 간접손실 산출이 어려울 경우 직접비와 간접비의 비율을 1:4로 추정하여서 간접비가 직접비의 약 4배에 달한다고 보았다.

1.1 분야별 안전(공정안전)

복잡한 장치와 설비 그리고 배관으로 구성된 화학공장을 체계적으로 관리하기 위한 방법론을 전문가들은 일찍부터 연구하기 시작했다. 다음 그림 8-4에서 보듯이 공정안전관리는 크게 예방안전과 대응안전으로 나뉜다. 이 그림을 보면 안전이 과학의 영역임이 분명하다. 공정상의 여러 가지 잠재 위험요소는 어떤 원인에 의해 공정이상 발생하면 사고가 발생하고 그 결과가 주변에 영향을 미친다. 각각의 과정에 해당하는 예시가 아래쪽에 나와 있으며 이에 대한 대책이 상자의 위쪽에 열거되어 있다.

예를 들면, 공정상 독성물질이 설비에 흐를 때(Hazard) 그 설비가 기계적인 결함에 의해(원인) 설계치보다 높은 온도를 기록하고(공정이상), 비상방출장치가(Protection) 가동하지 않게 되면 사고로 이어진다. 잠재위험의 원인이 있더라도 영향을 받지 않게 하는 것을 ‘예방(Prevention)’이라 하며, 기계적 결함이 있더라도 공정 이상이 발생하지 않게 하는 것을 ‘제어(Control)’라 한다. 우리나라의 공정안전은 1995년 대구사고 이전의 대응적인 안전관리 중심에서, 대구사고 이후 예방적인 안전관리 중심으로 무게중심이 이동하였다. 이를 산업용 로봇 작업장에 활용하면 보다 체계적인 대책수립에 큰 도움이 될 것이다.

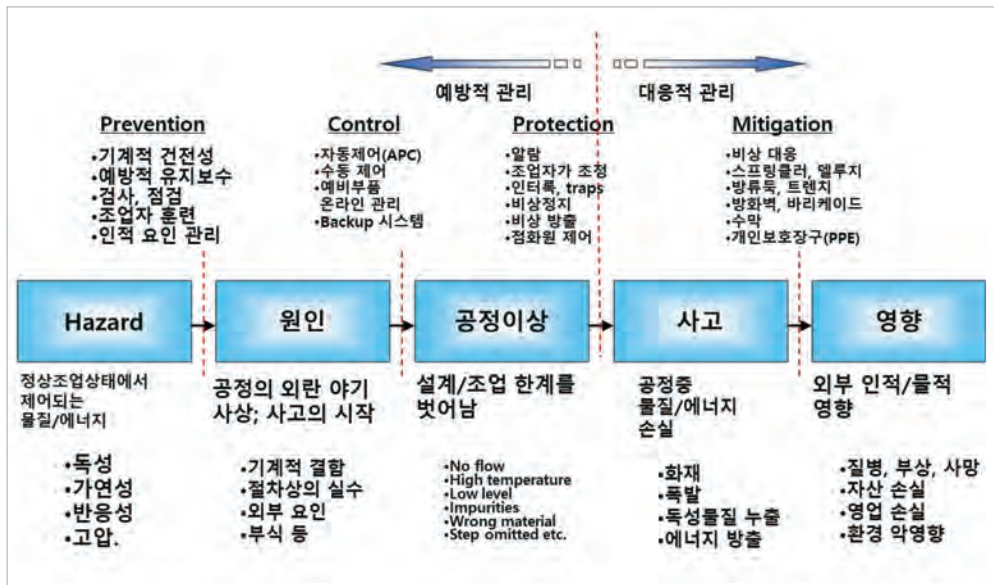


그림 8-4 사고의 진행에 따른 구성요소와 예방대책

1970년대 영국의 플릭스보로 사고와 이탈리아 세베소 사고, 1980년대 인도의 보팔 사고가 직접적인 계기가 되어서 공정안전관리제도를 도입하게 되며, 위험성 분석 시 가장 보편적으로 이용되는 방법은 조업과 운전성분석(Hazard and Operability, Hazop) 방법으로 통상 표 8-1과 같은 표를 활용한다.

표 8-1 HAZOP 분석에 전형적으로 활용되는 표

Node 1								
도면번호								순번 : 1
일명								날짜
대상부분(Node)								필요사항
설계의도								
Reboiler of C-001 Fractionation Column (Shell Design Pressure: 4 BarG, Shell Design Temperature: 180 Degree, Tube Design Pressure: 20 BarG, Tube Design Temperature: 295 Degree)								
번호	요소 (Parameter)	지침단어 (Guide word)	변수어 (Deviation)	가능한원인 (Possible cause)	결과 (Consequence)	보호조치 (Safeguards)	비고	요구조치 (Recommendation)
1	Flow	No	No Flow	PV001 malfunction closed	No significant damage. Production Loss.			
2	Pressure	High	High Pressure	PV001 malfunction opened	C-001 Explosion. Personnel. Asset. Environment Damage.	safety Valve PSV001 SIF to shutdown. XV002 by PSR002.		

기본적인 사항으로 평가에 참여한 전문가와 평가 일자, 위험성을 평가할 도면상에서 평가구간(Node)을 설정한다. 전문가는 통상 전체를 총괄하는 leader와 서기, 공정, 유지보수, 조업, 계장 등 각 분야의 숙련자들로 구성한다. 이 도표에서는 평가 대상부분이 재비기(Reboiler)이며 전체설비에서 이 기기의 역할(설계의도)은 분리기(Fractionation column)의 유출분을 재가열하는 것이다.

공정변수인 유체의 흐름, 온도, 압력 등에 대하여 지침단어인 No, High(More), Low(Less) 등을 결합하면 공정이상(Deviation)이 발생할 수있는 가능성을 빠짐없이 확인하게 된다. 그 가능성의 원인을 전문가들이 찾아내며 각각의 원인과 현재의 보호조치를 기록한다. 사고로 이어지는 심각한 영향이 없더라도 모든 사건(Event)에 대하여 빠짐없이 기록한다. 영향의 크기와 발생가능성을 기록하고 이를 조합하여서 전체의 위험도를 판정하며 기존의 보호조치

로는 안전하지 않은 경우 이에 대한 추가의 요구조치를 기입하며 이를 수행할 담당자도 함께 기록한다.

이러한 위험성 평가방법을 훨씬 더 정밀하게 발전시켜서 정량적 위험성 평가(QRA, Quantitative Risk Assessment)를 실시하게 된다. 그림 8-5는 정량적 위험성 평가를 수행하는 단계를 도식화한 것이다.

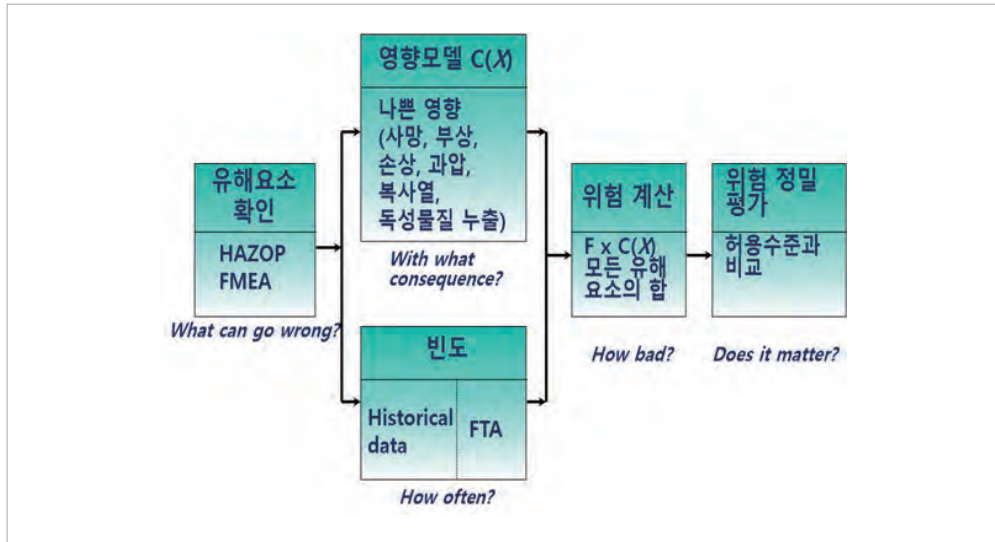


그림 8-5 유해물질 취급 공정의 정량적 위험성 평가

공정의 유해 위험요소를 확인하고 이러한 위험의 영향과 빈도를 분석하여서 이들의 곱으로 위험성을 산정하게 된다. 그다음 위험성을 정밀평가하여서 허용 가능한지 여부를 따진 후, 그 결과에 따라서 영향 혹은 빈도를 줄이는 조치가 추가로 필요한지 여부를 판단하게 된다. 이러한 절차는 뒤에서 설명할 로봇 작업 시 위험성 평가에서도 동일하게 적용한다. 이러한 평가절차를 좀 더 구체화하여서 제도로 발전시킨 것이 유럽의 이른바 SevesoII 지침이며 영국, 네덜란드 등이 이에 따라서 QRA(정량적 위험성 평가, Quantitative risk assessment)를 실시하고 부지이용계획 수립 시 그림 8-6과 같이 시설의 위험성에 따라서 인근 부지의 용도를 구분하여서 땅의 활용도를 높게 한 것이다.

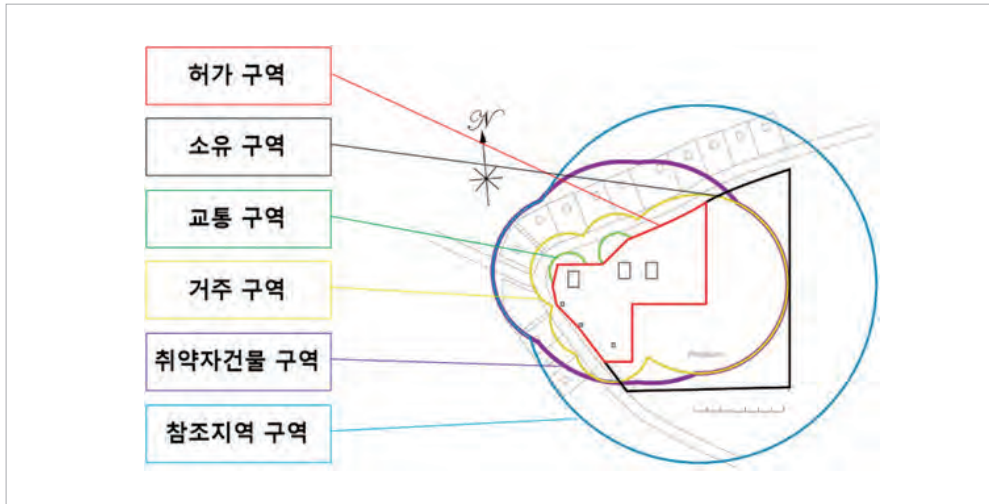


그림 8-6 화학생산시설 인근의 부지이용 개념도. 빨간색 구역(허가구역) 내 사각형 건물이 시설이다.

1.2 분야별 안전(건설안전)

건설산업이란 용어는 흙, 돌, 나무, 철제 등의 재료를 사용하여 주택, 학교, 창고 등의 건축물을 건설하거나 도로, 제방, 교량, 철도, 항만 등을 건설하고 유지하는 산업을 총칭하는 분야이다. 건설업과 건설용역업을 모두 포함하며 건설업이란 건설공사를 수행하는 업으로서 5개의 종합건설업과 25개의 전문건설업종 그리고 특별법(환경오염 방지시설업+주택건설업+해위건설업)에서 정의하는 업종이다. 건설용역업이란 건설공사에 관한 조사, 설계, 감리, 사업관리, 유지관리 등과 관련된 용역업으로서 엔지니어링, 건축설계와 감리업, 감리전문업을 포함한다.

특징으로 건설업자는 도급계약 형태로 발주자에게 공사를 의뢰받아 수주받은 공사를 완성하여 해당 발주자에게 인도하기 때문에 표준화, 규격화한 생산체계를 갖기 어려워서 도급의 형태에 따라 수직적 원,하도급 및 분업구조를 활용한 공동도급으로 수행하므로 발주량을 가늠하기 어려워 경영이 불안정한 속성을 지닌다. 또한 건설목적물은 토지의 정착물이므로 제품을 생산 후 이동시킬 수 없고 제품을 새로 생산하지 않고는 대체제가 존재할 수 없으며 생산활동이 현장에서 이루어져 시공 시마다 인력 및 기자재의 현장조달이 필요하여 생산조

직이 유동적, 불안정적인 성격을 띤다. 이 밖에도 옥외 생산 산업의 특성상 토지에 대한 의존도가 높고 계절, 지형, 기후에 민감하고 복합적인 성격을 지니므로 기획 및 설계 단계부터 준공, 하자보수까지 밀접한 관련성을 가지며 각종 시설물 구축을 통해 각종 산업 활동의 근간을 제공한다. 또한 생산제품의 규격화가 어렵기 때문에 기계장치 등 고정자산에 투입되는 설비 투자의 비중이 낮고 노동 의존도가 높아서 타 산업에 비해 노동 생산성이 낮게 나타나며 인적 재해 발생률이 높게 형성된다.

안전관리 문제점으로는 건설안전제도의 운영 미흡 및 실효성 부족, 현장 작업 위주의 건설공사, PDCA 연계성 부족 및 시공사 위주의 안전관리 등이 있으며 이에 대한 건설업 안전관리 개선 방향으로서는 건설공사 생산 방식이 현장 생산 방식에서 모듈러 생산 방식으로 전환, 건설생산체제와 안전관리체제의 단순화 및 명확화, 발주자선도의 총체적 안전관리 시스템 정착 등을 들 수 있다.

우리나라의 국토교통부에서는 2017년 발표한 「설계 안전성 검토 업무 매뉴얼」에서 설계 안전성 검토(Design for Safety, DfS)를 주요 골자로 하는 안전성 제고 방안을 제시하였는데 표8-2와 같은 ‘건설공사 안전관리 업무수행 지침(국토교통부 고시 제2016-718호) 별지 제1호 서식’은 표 8-1의 HAZOP 표와 거의 일치한다.

즉, 공종명은 Hazop의 평가구간에 해당하며 여기에서 위험요소를 Brain-storming으로 발견하여서 예상되는 결과를 인적/물적 피해로 구분한다. 그 발생빈도와 심각도에 따라서 위험등급을 매기며 이에 대한 저감대책을 구하게 된다. 위험요소 관리주체가 각각의 대책에 대한 수행을 담당하게 되며 그 대책 수행 이후의 잔여 위험요소를 추가로 기록하게 되어 있다.

표 8-2 건설공사 안전관리 업무수행 지침(국토교통부 고시 제2016-718호) 별지 제1호 서식

No	공종명	위험 요소	위험성					위험 요소 저감 대책	저감 대책 적용 후 위험 등급	위험 요소 관리 주체	위험요소저 감대책가정 /제3자에 의한 저감대책	잔여 위험요소		
			물적피해 (사고결과 사고유발원 인)	인적 피해	발생 빈도	심각 성	위험 등급					Yes /No	위험 요소 보유 자	안전 관리 문서

1.3 분야별 안전(인간공학)

인간공학은 인간을 위한 공학(Design for Human)이다. 즉, 인간공학은 인간의 행동·능력·한계·특성 등에 관한 정보를 발견하고, 이를 도구·기계·시스템·과업·직무·환경의 설계에 응용함으로써 인간이 생산적이고 안전하며 쾌적하고 효과적으로 이용할 수 있도록 하는 학문이다. 따라서 인간공학은 인간이 작업을 수행할 때 안전도 향상·피로와 스트레스 감소, 작업 만족 증가 등을 성취하여 더욱 향상된 작업과 삶의 질을 제공하는 것을 목표로 한다. 즉, 사람들이 사용하는 사물과 그 사용 환경을 바꾸어 사람의 능력·한계·요구에 한층 부합시키도록 해야 한다.



그림 8-7 인간공학의 개념 및 목표

인간공학 용어로 Human Factors, Human Factors Engineering, Human Engineering 그리고 Ergonomics가 있다. 이중 Ergonomics와 Human Factors가 주로 사용되며, Ergonomics는 유럽을 중심으로 산업체에서의 작업자와 생산성에 초점을 맞춘 연구에 주로 사용되어 왔으며, 그리스어 Ergon(작업)+nomos(법칙)의 조합으로 사람을 작업에 맞추는 것이 아니라 작업을 사람의 특성에 맞게 수행할 수 있도록 돕는 학문이라는 의미이다.

일반적으로 유럽에서는 주로 Ergonomics라는 용어를 많이 사용하고, 미국에서는 Human Factors를 더 많이 사용한다. Human Factors가 Ergonomics보다 넓은 의미로 여겨지나 Ergonomics는 물리적 인간공학 Human Factors는 인지적 인간공학을 대표하는 데 주로 쓰인다.

다양한 연구자의 연구를 통해 인간-기계 시스템의 비용이 확인되었다. 대표적인 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 인간의 과실

- ① 교통사고의 96%: 운전자 과실
- ② 항공기 사고의 80%: 조종사 과실
- ③ 안전사고의 84%: 작업자, 관리자 과실
- ④ 최신 병기 효율의 64%: 인간 과실

(2) 시스템 실패율(1970, NATO)

- ① 장비와 관련된 실패 원인: 37%
- ② 인간과 관련된 실패 원인: 63%
- ③ 장비 효율 1% 향상 비용: 100억
- ④ 인간 효율 1% 향상 비용: 0.3억

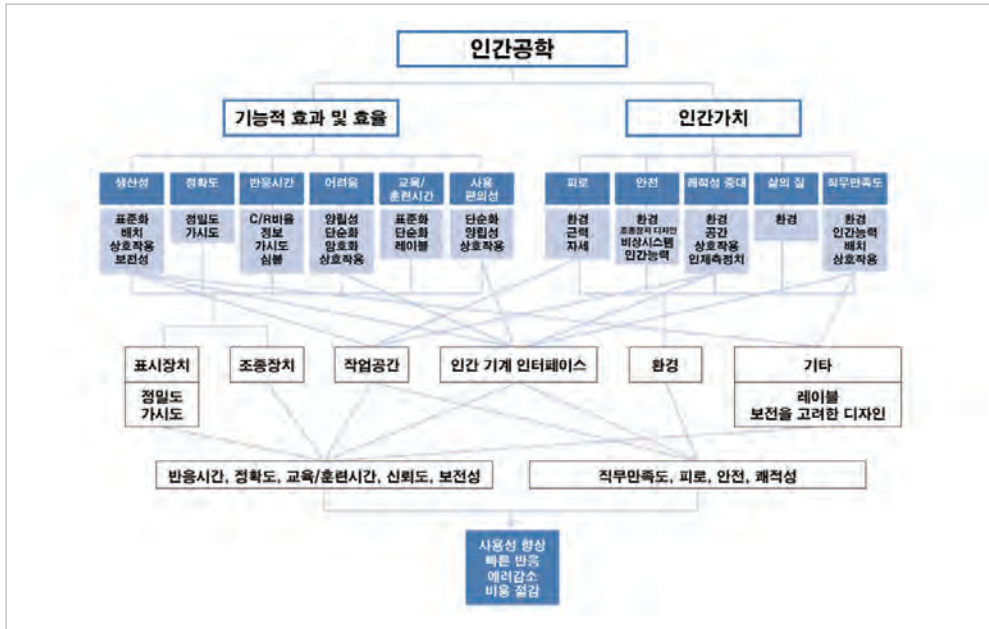


그림 8-8 인간공학의 연구 영역 및 상관도

인간공학은 다음 두 가지의 목적 달성을 통해 인간이 만든 물건, 기구, 혹은 환경의 설계 과정에서 사람들이 이런 것들을 잘 사용할 수 있도록 실용적 가치를 높이는 것이 주목적이다.

(1) 설계 시에 인간의 특성이나 행동에 관한 적절한 정보를 체계적으로 적용한다.

- ① 훈련 비용의 절감
- ② 인력 이용률의 향상
- ③ 사고 및 오인으로 인한 손실 감소

(2) 이러한 과정에서 바람직한 인간의 가치를 유지시키거나 향상시킨다.

- ① 개선된 안전성
- ② 피로와 스트레스의 감소
- ③ 사용자 허용성의 향상
- ④ 삶의 질 향상

조사 연구자가 특정한 연구 목적을 달성하기 위하여, 그 연구를 어떤 상황에서 실시할 것인가는 실험의 목적, 변수 관리 용이성, 사실성, 피실험자의 동기유발 및 안전 등을 고려하여 실험실, 현장, 모의실험 환경 중에서 선택하여야 한다. 표 8-3은 연구환경별 장단점을 요약한 것이다.

표 8-3 실험실·현장·모의실험 환경의 장단점

구분	장점	단점
실험실	변수 통제 용이 환경간섭 제거 가능 안전 확보	사실성이나 현장감 부족
현장	사실성이나 현장감	변수 통제 곤란 환경간섭 제거 곤란 시간과 비용
모의실험	어느 정도 사실성 확보 변수 통제 용이 안전 확보	고비용

인간공학 연구는 일반적으로 조사연구, 실험연구, 평가연구 세 가지로 나뉜다. 핵심 내용은 표 8-4에 요약하였다.

표 8-4 인간공학 연구의 종류

구분	목적	연구환경	변수	피실험자 표본	자료 수집	자료 분석
조사 연구	모집단 특성 파악	주로 현장환경 (때로 실험실)	기준변수 증화변수	상대적 큼	설문, 면담, 실제 측정	기술 통계
실험 연구	독립변수 영향 유의성	주로 실험실 환경 (현장 or 모의)	독립변수 종속변수	상대적 작음	설문, 면담, 실제 측정 (컴퓨터 이용 복잡한 방법 사용)	추측 통계
평가 연구	체계 혹은 제품 평가	주로 현장환경 (실험실 or 모의)				

참고문헌

- [1] 조규선, 위험성 평가를 통한 협동로봇 활용 자동차부품 조립공정의 안전성 향상 방안, 2020(한국산학기술논문지 제21권 제8호)

9

산업용 로봇 안전



최근 인간과 같은 공간에서 활용되는 협동 로봇(Collaborative robot)이 시장에 확산되고 있다. 세계 최초의 산업용 로봇은 1950년대 미국UNIMATE사의 자동차용접로봇으로서 유압 서보 구동식의 극좌표형 구조로 작동하며 그림 9-1과 같은 모습이다. 노조의 반대로 적용 문제가 발생하여 사용이 제한되었다는 점이 아쉽다. [1]



그림 9-1 세계 최초의 산업용 로봇

일본은 1970년대부터 전기식 서보 모터를 적용한 산업용 로봇을 개발하기 시작하여 자체 보유한 로봇부품 및 제품기술을 바탕으로 경쟁력을 확보해 왔다. FANUC, Yaskawa, Kawasaki 등 다수의 산업용 로봇 제조업체가 현재 활동 중이다. 유럽은 독일 KUKA사와 스

웨덴 ABB사에서 산업용 로봇을 개발하였고 독일 IRM사에서 서비스용 로봇을 개발하였으며 프랑스에서 서비스용(교육) 로봇을 개발하였다.

우리나라는 1980년에 전기식 서보 모터를 적용한 산업용 로봇을 KAISEM에서 개발하였으며 KAIST 변증남, 조형석, 광병만 교수팀이 연구용으로 원통좌표형을 개발한 것이 최초이다. 1984년 대우중공업에서 5축수직관절형 로봇 NOVA10을 개발하였고, 1990년초부터 전자부품조립용 로봇 및 Chip Mounter와 자동차용의 용접 및 Handling용 로봇을 개발하여 산업에 적용하였으며 2000년초부터 지식경제부 지원 아래 서비스용 로봇을 개발하기 시작하였다. 현재 산업용 로봇 제조업체로는 대기업 3사(현대, 두산, 한화) 외 다수의 중소기업이 있다.



그림 9-2 우리나라 최초의 로봇

기존 산업용 로봇은 안전펜스와 안전매트를 설치하여 인간과 로봇을 공간적으로 격리하여 사용하나 협동 로봇은 작업자와 직접 접촉하며 작업 공간을 공유하는 안전이 내재화되어서 저속, 저에너지의 안전기능이 보강된 산업용 로봇의 일종으로 작업자와 협업하는 작업용 로봇이다. 산업용 로봇은 표 9-1과 같이 관절이나 좌표 및 설치 장소에 따라 구분하며 그 아래에 중분류, 세분류에 따라 대개 7가지 유형으로 분류한다.

표 9-1 산업용 로봇의 구분

분류기준	중분류	세분류	설명
관절 기준분류	수직 다관절형로봇	직렬형로봇 (Serial Manipulator)	조인트 또는 관절이 로봇 베이스(Robot base)에서 끝(End- Effector)까지 직렬로 연결되는 구조
		병렬형로봇 (Parallel Manipulator)	로봇의 강성을 높이기 위해 병렬식으로 배치된 구조
	수평 다관절형로봇 (SCARA로봇)	팔의 기계구조가 평행축인 회전 조인트를 가지며, 축에 직교하는 평면 내에서 컴플라이언스를 가진 로봇	
좌표 기준분류	직교 좌표형로봇 (Cartesian Coordinated Robot)	직선운동기구를 1~3개 조합하여 사각형의 작업공간을 결정하는 로봇	
		갠트리로봇 (Gantry Robot)	직교좌표형로봇 + 1축 직선주행 프레임
	원통 좌표형로봇	가동범위가 제1축 회전축을 중심으로 하는 원통형인 로봇	
	극좌표형로봇	1.2축이 회전축, 3축이 직선축으로 작업공간이 구형인 로봇 (Spherical Coordinate)	
설치 장소에 따른 분류	데스크탑형	책상 정도 크기의 중소형 로봇을 총칭	
	특수용도	특수분야에서 사용되는 제조업용 로봇	

이 로봇은 산업용 로봇에, 숙련된 인력 공급이 어렵고 작업 공간이 협소한 중소기업에 사용할 목적으로 2000년대 초 유럽을 중심으로 개발되었고 이후, 안전이 보강된 협동 로봇으로 발전하게 된다. 국내에서는 협동 로봇, 협업 로봇, 코봇 등으로 불리었으나 2012년에 KS B ISO 8373이 제정되면서 협동 로봇으로 통일되었다. 협동 로봇 시장은 2016년 8.4백만 달러(2016)→19백만 달러(2017)→668.6백만 달러(2025)까지 연평균 52.4% 성장하는 것으로 전망되고 있다. 협동 로봇은 산업용 로봇과 달리 상대적으로 저속, 저에너지의 특징이 있으므로 다품종 소량 생산공정, 생산품을 주기적으로 변경해야 하는 공정에 적용이 유리하여 중소기업의 좁은 작업장에서도 근로자와 함께 단순 반복작업, 힘을 보조하는 작업에 적합하다. 또한, 작업자의 고령화와 주 52시간 근무제 도입으로 협동 로봇의 수요는 확대될 것으로 예상된다. 다음 그림 9-3은 산업용 로봇의 다양한 적용 사례를 보여준다.



그림 9-3 산업용 로봇의 다양한 적용 사례

그러나, 협동 로봇은 같은 공간에서 작업자와 함께 작업을 해야 하므로 알려지지 않은 위험에 노출될 수 있다. 협동 로봇의 종류, 설치된 환경, 작업자의 숙련도, 작업자의 몸 상태 등에 따라 정형화하기 어려운 다양한 형태의 위험 요인이 발생할 수 있다. 자료에 따르면, 2008년부터 2017년까지 제조업종 산업용 로봇 재해현황은 2017년에 사망 1건을 포함하여 전체 33건의 재해가 발생하였다. 산업용 로봇의 위험도가 972로서 대표적 위험기계인 컨베이어 348, 크레인 497보다 월등히 높은 것으로 산업용 로봇과 작업자 간, 신체 충돌, 로봇점검 중 부딪힘, 끼임, 감전 등 로봇과 작업자의 격리 실패로 인한 산재사고가 사망 등 중대재해이기 때문이다.

산업용 로봇의 사고 원인은 크게 4가지로서 인적 요인(Man), 설비적 요인(Machine), 작업적 요인(Media), 관리적 요인(Management) 등으로 구분한다. 인적 요인으로는 심리적 원인(망각, 고민, 집착, 판단 착오, 생략 행위 등), 생리적 원인(피로, 수면 부족, 신체 기능 저하, 음주 등), 직장적 원인(직장 인간관계, 팀워크 결여, 대화 부족 등) 등을 들 수 있으며, 설비적 요인으로는 기계설비 설계적 결함, 방호장치 불량, 표준화 부족, 정비, 점검 미흡 등을 들 수 있다. 작업적 요

인으로는 작업 정보의 부적절, 작업 자세나 동작의 결함, 작업 방법의 부적절, 작업 공간 부족이나 환경 부적합 등을 들 수 있으며 관리적 요인으로는 관리조직의 결함, 교육훈련 부족, 규정/매뉴얼 불비, 지도/감독 결여, 적성 배치 불량, 건강관리 불량 등을 들 수 있다. 그림 8-4와 비교하면 매우 유사하다는 것을 발견할 수 있다.

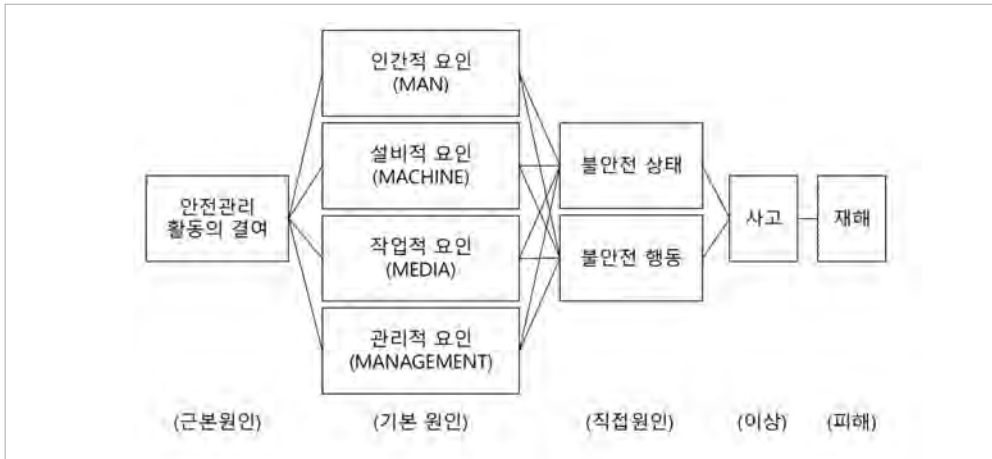


그림 9-4 재해와 4M과의 연쇄 관계

작업장의 위험 종류는 다음의 표 9-2와 같이 크게 기계적 위험, 화학적 위험, 에너지 위험, 작업적 위험 등으로 나눌 수 있으며 이에 대한 사건의 형태가 잘 기술되어 있다.

표 9-2 위험의 종류와 해당 사건 형태

구분	위험의 종류	사건 형태
기계적 위험	접촉적 위험	틈에 끼임, 말려들어감/잘림, 스침/격돌, 찢림
	물리적 위험	비래, 낙하물에 맞음/추락, 전락(轉落)
	구조적 위험	파열, 파괴, 절단
화학적 위험	폭발, 화재 위험	폭발성 물질, 발화성 물질, 산화성 물질, 인화성 물질, 가연성 물질
	생리적 위험	부식성 물질, 독극성 물질
에너지 위험	전기적 위험	감전, 과열, 발화, 눈의 장애
	열 기타의 위험	화상, 방사선 장애, 눈의 장애
작업적 위험	작업방법적 위험	추락, 전도/비래, 낙하물에 맞음/격돌/사이에 끼임
	장소적 위험	추락, 전도, 붕괴, 낙하물에 맞음, 격돌

산업용 로봇의 안전을 위하여 안전방책으로 공간을 확보하며 이는 그림 9-5와 같이 로봇의 움직임에 따라 작업영역, 제한영역, 그리고 최대영역으로 구분하며 이를 1.8m 이상의 울타리로 보호하게 된다. 로봇 근처의 위험영역은 색으로 구분하며 울타리로 사람이 들어갈 때에는 출입문은 안전 플러그를 반드시 뽑아야 열 수 있도록 조치하고, 출입자는 안전 플러그를 몸에 지닌 채 안으로 들어가도록 해야 한다.

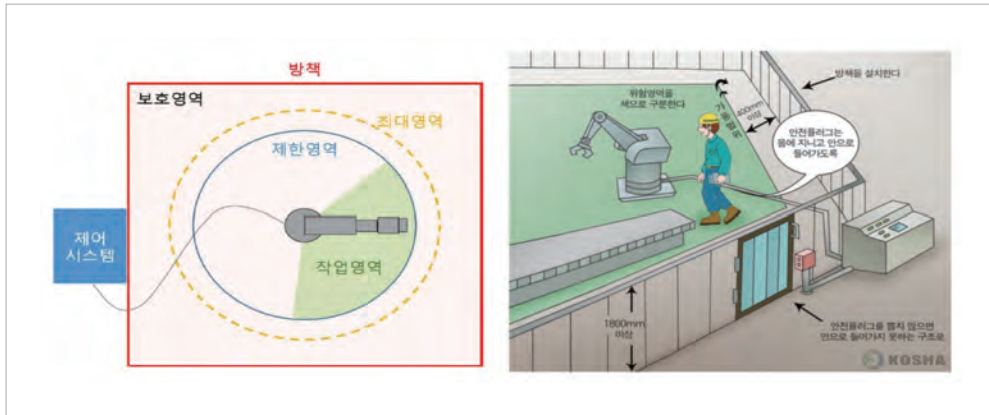


그림 9-5 산업용 로봇 안전의 개념

1. 위험성 감소 기술적 대책

기술적인 위험성 감소 대책으로는 비상정지 버튼, 인터락 스위치, 안전 라이트 커튼, 동작 허가장치, 방호벽 설치 등이 있으며 이 밖에도 오동작이나 폭주, 안전거리 미확보, 로봇의 설정 오류, 작업자의 실수 등에 대하여 각각 그 위험을 감소하는 방법을 제시하기도 한다.

1.1 기술적 위험성 감소 대책

비상정지버튼

그림 9-6처럼 눈에 띄기 쉬운 적색과 경고를 뜻하는 노란색을 조합하여서 비상정지 버튼을 설치한다.

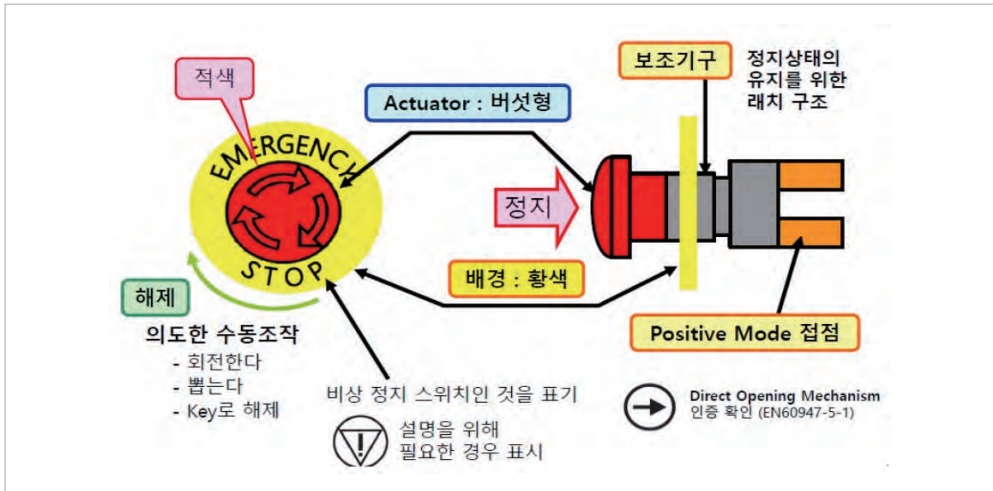


그림 9-6 비상정지 버튼 활용 예시

인터락 스위치

ISO 14119에서는 그림 9-7처럼 인터락 스위치를 설치하며 이들의 기능을 쉽게 무효화할 수 없도록 설치한다.



그림 9-7 인터락 스위치 설치 사례

안전 라이트 커튼

IEC 61496-에 의하면 센서가 고장났을 경우에도 항상 안전한 상태를 설계하기 위하여 그림 9-8처럼 작동하는 fail-safe 장치를 설치하며 센서는 고장 자가 진단을 할 수 있도록 설치한다.

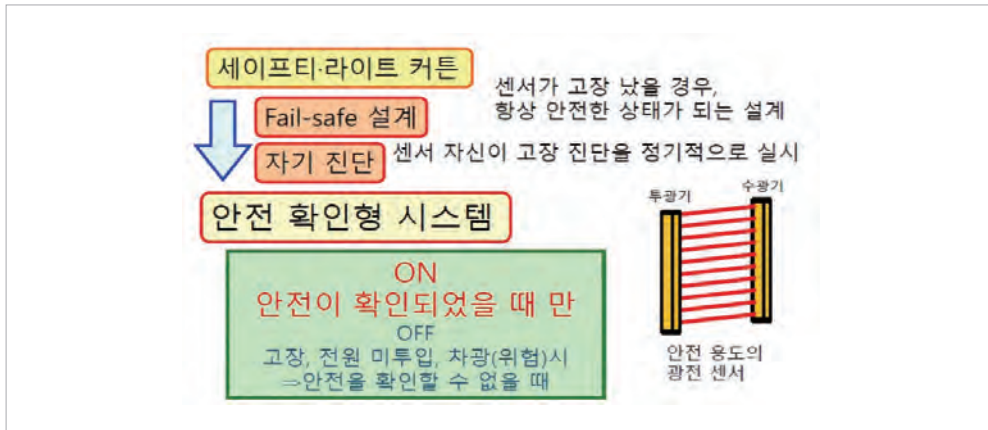


그림 9-8 안전 라이트 커튼 설치 사례

동작 허가장치

ISO 10218-1에서는 그림 9-9처럼 동작 허가장치를 설치하며 작업자가 일정한 힘으로 스위치를 작동해야만 로봇이 기능을 할 수 있도록 설치한다.

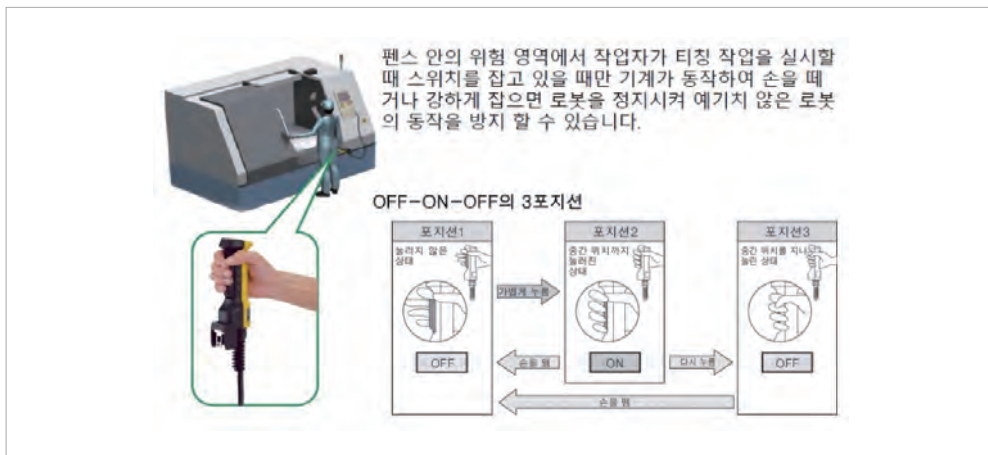


그림 9-9 동작 허가장치 설치 사례

방호벽 설치

ISO 143857에 따르면 그림 9-10처럼 로봇과 사람 사이에 일정한 높이의 방호벽을 설치한다.

기본적으로 국내법(안전 검사)에서는 1,800mm 이상을 요구하고 있으나, 안전 거리에 따라 1,400mm 이상으로 할 수 있음.

Dimensions in millimetres

Height of hazard zone ^a <i>a</i>	Height of protective structure ^{a, b} <i>b</i>								
	1 000	1 200 ①	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 500
Horizontal safety distance to hazard zone, <i>c</i>									
2 700	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 600	900	800	700	600	500	400	300	100	0
2 400	1 100	1 000	900	800	700	600	400	300	100
2 200 ②	1 300	1 200 ③	1 000	900	800	600	400	300	0
2 000	1 400	1 300	1 100	900	800	600	400	0	0
1 800	1 500	1 400	1 100	900	800	600	0	0	0
1 600	1 500	1 400	1 100	900	800	500	0	0	0
1 400	1 500	1 400	1 100	900	800	0	0	0	0
1 200	1 500	1 400	1 100	900	700	0	0	0	0
1 000	1 500	1 400	1 000	800	0	0	0	0	0
800	1 500	1 300	900	600	0	0	0	0	0
600	1 400	1 300	800	0	0	0	0	0	0
400	1 400	1 200	400	0	0	0	0	0	0
200	1 200	900	0	0	0	0	0	0	0
0	1 100	500	0	0	0	0	0	0	0

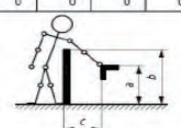


그림 9-10 방호벽 설치 사례

1.2 위험 특성에 따른 위험성 감소 대책

로봇 자체의 오작동, 폭주

그림 9-11에서는 다양한 원인으로 로봇이 오작동하거나 폭주하는 위험에 대하여 예시하고 있는데 이에 대하여 신뢰성있는 안전회로 구축 등으로 예방하도록 하고 있다.

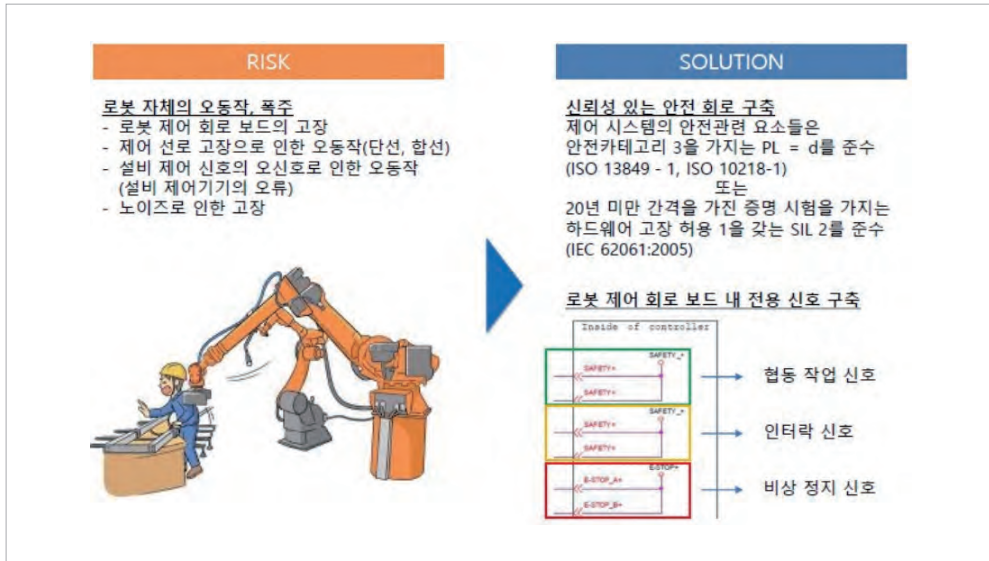


그림 9-11 로봇의 오작동, 폭주에 대한 대책 예시

안전거리 미확보

그림 9-12에서는 안전거리 미확보로 인한 위험에 대하여 예시하고 있는데 이에 대하여 로봇 반경을 고려한 안전거리 확보초지 등으로 위험을 예방하도록 하고 있다.

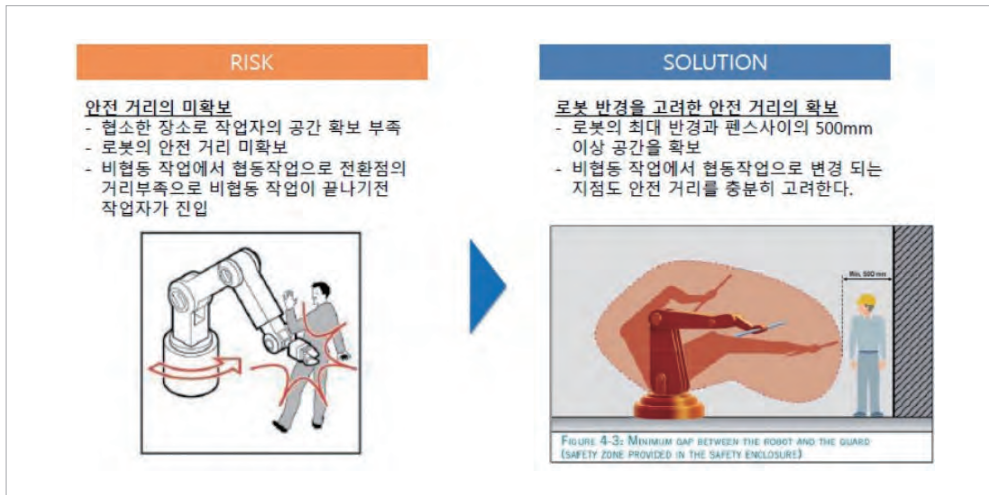


그림 9-12 로봇과의 안전거리 미확보에 대한 대책 예시

로봇의 설정 오류

그림 9-13에서는 로봇의 설정 오류 위험에 대하여 예시하고 있는데 이에 대하여 자동 계산 프로그램 문서화 등으로 예방하도록 하고 있다.

RISK

로봇의 설정 오류

- 협동 모드에서의 안전 속도 계산
- 협동 모드에서 로봇 접촉시 신체 부위 압력

안전거리 및 속도 계산의 어려움

- 난해한 계산식으로 설계자가 계산이 어려움

표 A.5-1 신체 부위를 근거로 계산된 충격 및 충격에 의한 신체 부위 부하

1. 20%의 충격에 의해 신체 부위를 충격 받은 후의 충격 부하를 나타내며 충격 부하에 대한 충격 부하 계수를 나타낸다

신체 부위	1	2	3	4	5	6
손목/팔꿈치	2,400	2,000	2,000	200	2,000	1,000
팔꿈치	2,200	1,800	1,800	1,000	1,800	1,000
어깨	2,400	1,800	1,800	1,000	1,800	1,000
허리	2,800	2,000	1,400	100	800	700
다리	2,700	1,900	1,200	100	800	700
신체 전체	2,000	1,400	100	800	800	900
머리/목/얼굴	1,700	1,200	800	500	400	440
손목	1,700	1,200	800	500	400	440
팔꿈치	1,500	1,100	700	500	400	400

$S_p(f_c) = S_0 + S_1 + S_2 + C + Z_d + Z_r$

참고: 1. 신체 부위를 충격 받은 후의 충격 부하 계수
2. 충격 부하 계수
3. 충격 부하 계수
4. 충격 부하 계수
5. 충격 부하 계수
6. 충격 부하 계수

SOLUTION

자동 계산 프로그램 또는 문서 양식의 공통화

설계자의 로봇 설정 오류를 줄이기 위해 전용 프로그램, 전용기기 사용으로 안전 거리와 속도, 압력을 계산하고 문서화.

(ISO TS 15066)

그림 9-13 로봇의 설정 오류에 대한 대책 예시

작업자의 실수

그림 9-14에서는 다양한 형태의 작업자 실수와 이에 따른 대책을 예시하고 있다.

RISK

작업자의 실수

- 작업자의 버튼 오조작
- 작업자의 협동, 비협동 모드의 구분 오류
- 협동 작업 시 작업자의 작업순서를 혼동
- 작업자가 로봇의 상태를 모르는 상태로 작업하여 긴장상태 지속(인간공학)

SOLUTION

작업자가 알기 쉬운 설계 반영

- 작업자의 작업버튼, 터치조작 버튼, 화면 조작 버튼의 색상 통일화(협동 영역 바닥에 표시)
- 타워 램프, 지시자이더, 스피커 소리로 작업자에게 작업순서를 가이드
- 협동 비협동 작업의 가이드를 작업자의 위치 감지로 안전회로에서 결정

그림 9-14 작업자 실수에 대한 대책 예시

작업안전수칙 제정 및 숙지

위와 같은 다양한 사고의 발생 원인에 효율적으로 대응하기 위하여 그림 9-15에서처럼 산업용 로봇 작업안전수칙을 예시하여 이에 따르는 각종 사고를 예방하도록 하고 있다.

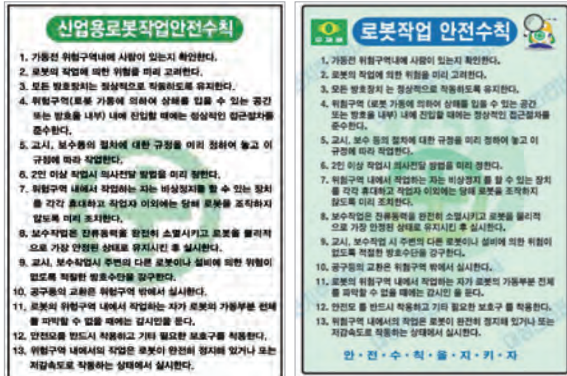


그림 9-15 산업용 로봇 작업안전수칙 예시

2. 위험성 평가 절차

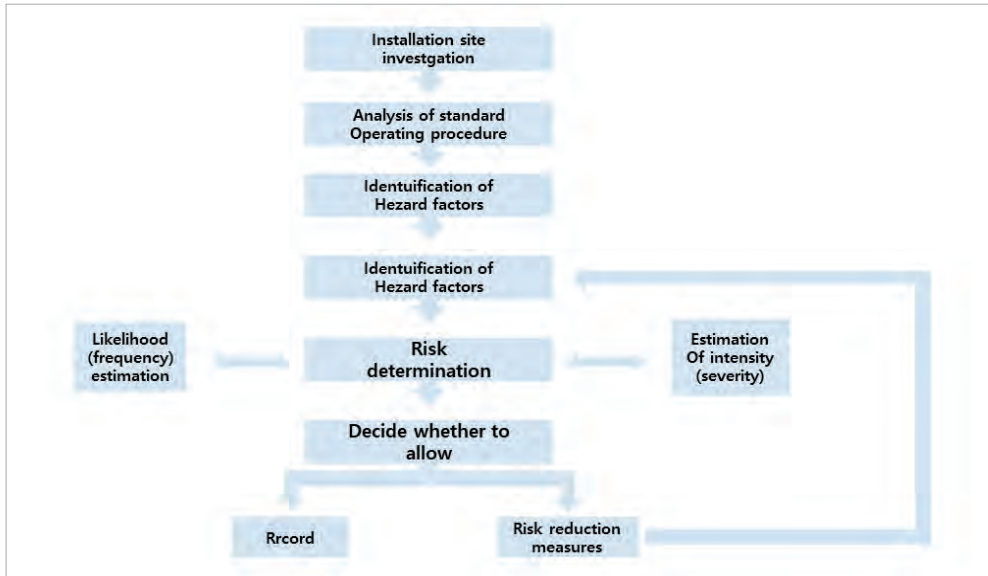


그림 9-16 산업용 로봇 위험성 평가 절차 및 조치 사항

설치현장의 주변 상황 확인, 작업자 동선 파악, 작업자 접근 횟수와 시간 조사 등 설치현장조사를 시작으로 업무 매뉴얼을 통한 작업공정과 작업표준을 분석하고, 이를 바탕으로 위험요소(Hazard)를 발굴, 위험성(Risk) 결정, 허용여부 판단, 개선 조치까지 마무리하는 절차를 그림 9-16과 같이 제시하였다. 이는 그림 8-5에서 유해화학물질을 취급하는 시설에서의 위험성 평가 절차와 매우 유사하다.

3. 디스크 스냅링 조립 공정의 위험성 평가

3.1 주요 위험요인

디스크 스냅링 조립 공정에서 협동 로봇의 위험성은 그림 9-17과 같이 사람과 로봇이 장소적·시간적으로 겹치는 영역에서 발생하며, 위험성은 겹치는 영역이 커질수록 늘어난다. ISO 12100 표준을 적용받는 협동 로봇은 기계적 위험, 전기적 위험, 열적 위험, 인체공학적 위험, 소음, 진동, 방사선, 재료 및 물질 등의 위험이 있다. 특히, 기계적 위험은 로봇 암의 정상/우발 동작, 말단장치 또는 로봇 셀의 정상/우발 동작, 말단장치 고장/분리, 정비 시 말단장치의 동작, 작업 시 기계 또는 로봇 셀 부품의 우발 동작, 재료 및 제품의 낙하/분출, 도구의 우발 풀림, 말단장치에서 날카로운 도구의 회전/동작 등이 있고 압착(Crushing), 전단(Shearing), 절단(Cutting), 말림(Entanglement), 충격(Impact), 찔림(Stabbing or Puncture) 등의 재해가 발생할 수 있다.

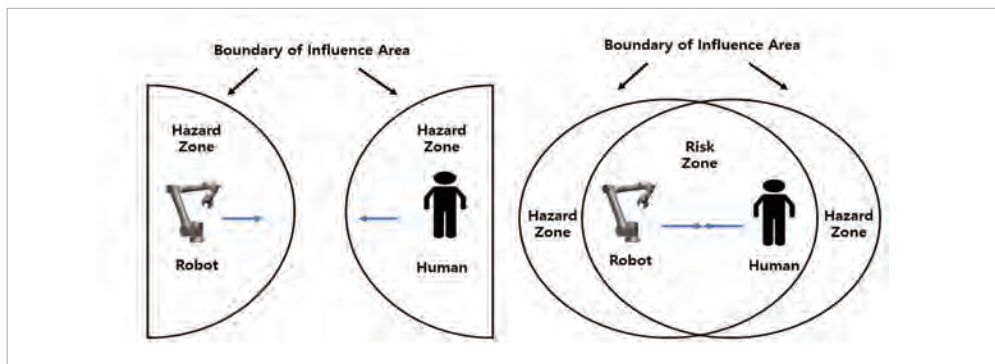


그림 9-17 협동 로봇과 인간이 작업할 때 예상되는 위험성 개념

3.2 위험성 평가 기준 정립

그림 9-18은 위험성 평가를 실시하고자 하는 디스크 스냅링 조립 공정의 공정 개념도이다. 협동 로봇은 ❶ 스냅링 자동공급기에서 디스크 셋을 넣고 스냅링을 선택하여 ❷ 두께 측정 후 ❸ 압입콘 내 이재하고 최종적으로 작업자가 압입기로 끼워 고정한다. 작업분석 과정을 통해 사고의 주원인인 작업자가 작업방법을 무시하거나 생략 혹은 오인 행동, 작업순서 반대 실행, 과부하로 인한 만성피로 상태의 작업 등을 사고의 원인으로 파악할 수 있다. 따라서, 면밀한 작업분석을 통해 올바른 작업 방법과 절차를 파악하고 위험요인을 발굴하는 기초 작업을 충분히 하여야 한다. 작업분석 절차는 위험성 평가 과정에서 작업자가 표준 작업 방법을 충분히 이해하고 있으며 실제 작업표준대로 행동하는지를 현장조사 단계에서 확인하는 기준으로 활용된다.

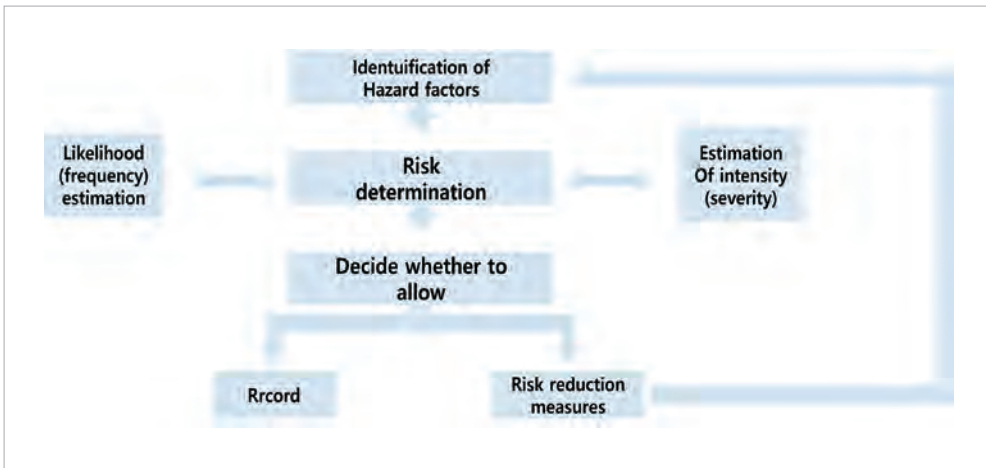


그림 9-18 위험성 평가 절차

협동 로봇 제원

- 중량 : 28.9 kg
- 가반하중 : 10 kg
- 미치는 범위 : 1300 mm
- 관절범위 : $\pm 360^\circ$
- 자유도 : 6 회전관절
- 동력전원 : 100~240 VAC
- 재질 : 알루미늄, PP 플라스틱

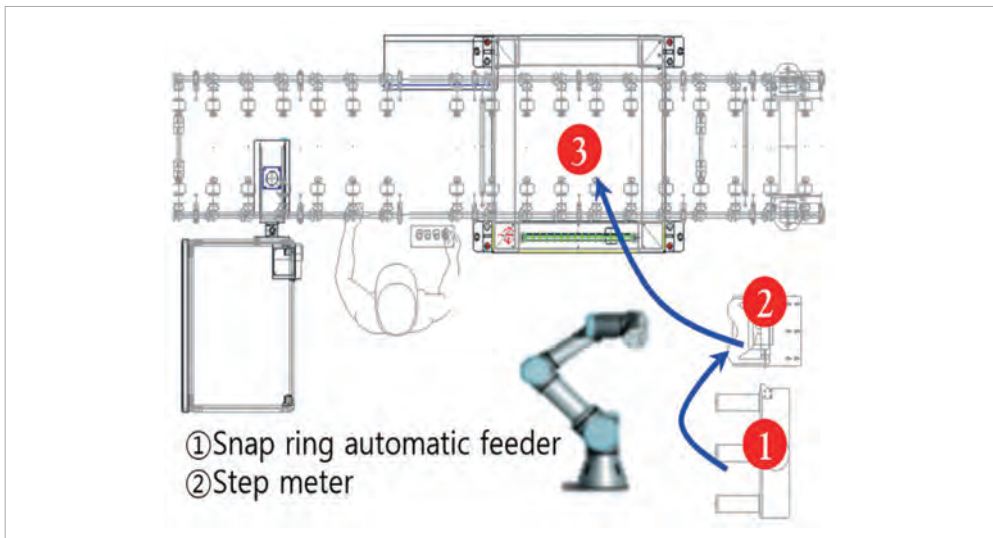


그림 9-19 협동 로봇 작업 공간 개념도

3.3 위험성 평가 기준

협동 로봇의 위험성 평가 일반원칙은 ISO 12100에 기반하여 사전 평가계획을 수립하는 것에서부터 출발한다. 표 9-3과 같이 위험의 발생가능성인 빈도 1점은 작업 중 사고가 매년 1회 발생, 2점은 작업 중 사고가 매년 2회 발생, 3점은 작업 중 사고가 매년 3회 이상 발생할 경우로 정의하였다.

표 9-3 빈도 구분 기준

빈도		설명
높음	3	연간 3회 이상 사고 발생
중간	2	연간 2회 이상 사고 발생
낮음	1	연간 1회 이상 사고 발생

표 9-4와 같이 위험의 심각성(치명도)인 강도 1점(경미)은 운전성 향상을 위한 개선을 목적으로 하는 무시할 수준의 손실일 수 없는 사고, 2점(보통)은 휴업일수 4일 미만의 사고, 3점(중대함)은 휴업일수 4일 이상 90일 미만의 사고, 4점(치명적)은 사망, 휴업일수 90일 이상의 사고로 정의하였다.

표 9-4 영향 심각도 구분 기준

심각도			범위
매우 높음	치명적	4	사망 혹은 90일 이상 휴무
높음	매우 심각	3	휴무 4~90일
중간	심각	2	4일 미만 휴무
낮음	가벼움	1	무시할 만한 결과

위험성 추정은 행렬 조합법으로 표 9-5와 같이 정의하였다.

표 9-5 위험도 구분 기준

빈도 심각도	3	2	1
4	5	5	3
3	4	4	2
2	3	2	1
1	2	1	1

위험성 결정의 위험 수준(표 9-6)은 사업장에서 일반적으로 사용하는 체크리스트 기법을 준용하여 1점(무시할 수 있는 위험)은 현재의 안전대책을 유지, 2점(경미한 위험)은 보호구 착용, 안전난간 설치, 안전정보 및 주기적 표준작업 안전교육 제공이 필요하나 현 상태로 작업

이 가능, 3점(상당한 위험)은 조건부로 계획된 기간에 안전대책을 세워야 하는 위험, 4점(중대한 위험)은 긴급 임시 안전대책을 세운 후 작업을 하되 계획된 기간에 안전대책을 세워야 하는 위험, 5점(허용 불가한 위험)은 즉시 작업중단(작업을 지속하려면 즉시 개선을 실행해야 하는 위험)이 필요한 위험이다.

표 9-6 위험도 관리 구분 기준

위험성 수준		개선사항
수용 불가	5	즉시 작업 정지 (개선 후 작업 속개)
심각	4	임시 비상조치 수립 후 작업하되 조치 수립 계획
중대	3	일정기간 내 안전조치 수립
경미	2	보호장치, 안전교육 등 법규상 안전조치 만족
무시할 만함	1	현재 조치 유지

3.4 위험성 평가 결과

발생빈도와 강도는 위험성 평가 전문가 1명과 설치업자 2명, 생산관리자 1명, 안전관리자 1명, 대학 안전학과 교수 1명이 브레인스토밍 방식으로 결정하였다. 위험성 추정은 행렬 조합법으로 표 9-7과 같이 결정하였다. 표 9-7의 빈도, 강도, 위험도를 상하로 나눈 것은 개선 전과 후의 위험을 표시한다. 위험성 평가 결과 작업자와 로봇의 충돌사고 위험이 제어상태 미표시, 라이트커튼 기능 해제, 교시운전 중 불시 기동, 조작 펜던트의 위험지역 내 보관, 비상정지 버튼 미설치 등의 원인으로 파악되었고 작업개시 전에 개선되어야 할 수준이었다.

표 9-7 주요 위험요소와 위험도

번호	형태	위험요소	빈도	심각도	위험성
M-1	충격	로봇의 제어판이 깨끗하지 않아서 전 공정에서 예기치 않게 로봇, 제품이 작업자와 충돌	3	2	3
			2	2	2
M-2	충격	충돌장치 정지기능 작동불능으로 작업자와 충돌 가능	3	2	3
			2	2	2
M-3	충격	로봇 수동 작동으로 작업자와 충돌 가능	3	2	3
			1	2	1

번호	형태	위험요소	빈도	심각도	위험성
M-4	충격	조작 스위치가 로봇 작업 반경에 있어서 충돌 위험	3	2	3
			1	2	1
M-5	충격	비상정지 버튼 부재로 충돌 위험성	3	2	3
			2	2	2

4. 디스크 스냅링 조립 공정의 위험성 저감

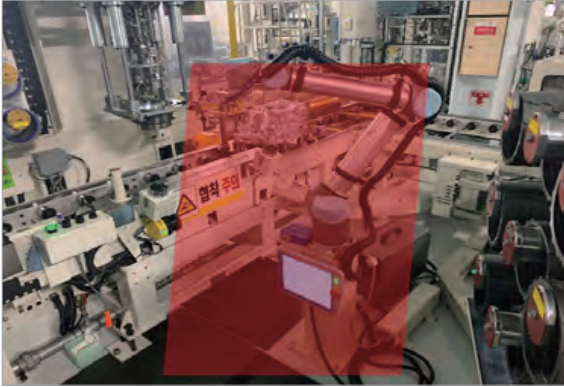
4.1 위험성 저감 조치

위험성 저감 조치로는 다음과 같은 사항이 있다.

(a) 로봇의 운전상태가 명확히 표시되지 않은 부분은 발광 누름 버튼으로 교체하고 터치 화면에 조작상태를 명확히 표시하도록 개선하였다.



(b) 작업자와 로봇 사이에 설치된 라이트 커튼의 무효기능을 제거하고 설정한 영역(스캔 범위)에 접근 시 항상 로봇이 급정지하도록 하였다.



(c) 로봇 수동조작 시 예상치 못한 작동을 방지하기 위해 작동속도를 250mm/s 이하로 제한하였으며, 충돌 감지 정지기능을 활성화하였다.



(d) 위험구역 내 조작 펜던트는 안전한 구역으로 위치를 변경하여 보관하였다.



(e) 작업자와 인접한 위치에 비상정지 버튼을 설치하여 위급 시 신속히 비상정지되도록 하였다.



4.2 국제규격에 의거한 저감 조치

ISO TS 15066 표준에 따른 협동 운전의 4가지 유형별 위험성 감소 방법은 표 9-8과 같다. 협동 로봇의 핵심적 특징 중 하나는 공정 재배치가 용이하다는 점이다. 따라서, 기존 작업 방식의 변동이 있을 경우, 동 표준에서 제시하고 있는 협동 운전 유형별 안전기준을 숙지하고 준수하여야 한다. 이때 주의할 것은 바뀐 환경을 고려하여 위험성 평가를 재실시하는 것이 안전하다.

표 9-8 협동 로봇의 위험도 저감 방법론 사례

조업	위험성 지각 방법	안전조치 (예)
안전감시 정지	협동 작업 구역 내 동작감지 시 로봇은 작업 정지	빛 커튼, 레이저 스캐너, 시각 센서 등
수작업 안내	조업자의 안내에 의해서만 로봇 조업	구동장치에 의한 교육 장치
속도 및 위치 감시	사람과의 거리가 안전거리 이상일 때만 로봇 작동	레이저 스캐너, 접근 센서, 비전 센서 등
가동력 제한	로봇의 구동력이나 힘을 제한	토크 센서, 레이저 센서, 비전 센서 등

참고문헌

[1] Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 8 pp. 342-347, 2020

비전 및 인식 지능



지능형 로봇 시스템은 외부 환경을 인식하고, 상황을 판단하여 자율적으로 동작하는 로봇을 의미한다. 이 중에서 외부 환경을 인식하기 위해 로봇은 인간과 마찬가지로 시각 정보에 크게 의존한다. 이번 장에서는 로봇의 비전 및 인식 시스템과 적용 분야에 대해서 살펴본다.

로봇 비전 시스템은 카메라, 거리 센서 등의 비전 센서들로부터 획득한 데이터를 이용하여, 주변 환경으로부터 정보를 획득하는 것을 목적으로 한다. 비전 센서로부터 획득한 데이터가 입력되면, 전처리 과정을 통해서 데이터를 가공하거나 데이터의 크기를 축소한다. 이후 특징들을 추출하고, 이들을 바탕으로 분류하는 것이 일반적인 구조이다. 이러한 구조를 기반으로 하여 비전 시스템은 다양한 분야에 적용된다. 로봇 비전 시스템은 주변 환경 내의 물체 인식, 사용자 얼굴, 자세/행동 인식, 3차원 복원, 지도 작성 및 현재 위치 인식 등 로봇의 지능에 있어서는 필수적인 요소라고 할 수 있다.

1. 로봇 비전 시스템 구조

로봇 비전 시스템은 비전 센서로부터 획득한 데이터로부터 유의미한 정보를 추출하는 시스템을 의미한다. 비전 시스템의 세부적인 요소는 다양하지만 그림 10-1과 같이 데이터 입력, 전처리, 특징 추출, 분류 단계로 구성할 수 있다.



그림 10-1 로봇 비전 시스템 구조

1.1 비전 센서 및 데이터

비전 센서는 크게 수동형 센서와 능동형 센서로 분류할 수 있다. 수동형 센서는 외부에서 들어오는 빛의 정보를 데이터화하는 센서로서 이미지 센서 또는 카메라가 대표적이다. 능동형 센서는 센서의 송신부에서 신호를 방출하고, 수신부로 돌아오는 신호를 감지하여 위상차 또는 시간차를 이용하여 센서로부터 거리를 측정할 수 있다. 초음파 센서, 라이다(Lidar), 레이더(Radar) 등이 능동형 비전 센서에 해당한다.

카메라는 사람의 눈을 모방하여 만든 센서이다. 사람의 눈은 외부의 빛이 동공을 지나서 망막에 있는 시각 세포(원추 세포, 간상 세포)에 닿으면 전기적 신호를 발생시킨다. 카메라도 이와 마찬가지로, 핀홀 또는 렌즈를 지난 빛이 이미지 센서에 도달하면 2차원 그리드 형태로 배열되어 있는 소자가 전기적 신호를 발생시킨다. 이러한 개별적인 소자를 픽셀(pixel)이라고 하며 이미지 해상도를 결정한다.

이미지 센서는 일정한 시간 동안 도달한 빛의 양만을 계산할 수 있어 특정한 색상에 대한 정보는 기본적으로는 획득할 수 없다. 사람의 경우 시각 세포는 간상 세포와 원추 세포로 나뉘는데, 간상 세포는 빛의 양에 민감하게 반응하여 밝기 값을 감지하고, 원추 세포는 빨강, 파랑, 초록의 파장에 반응하여 이를 통해서 색을 감지한다. 이미지 센서의 경우 모든 픽셀 전방에 색상 필터를 부착하여 특정한 픽셀은 특정한 색상의 빛만 투과시킨다. 이러한 구조를 컬러 필터 어레이라고 하며, 이를 보간법을 통해서 RGB(Red, Green, Blue) 3개의 영상으로 만들어 낸다. 각각의 영상은 이미지 센서의 픽셀 해상도와 같은 크기를 가지는 행렬

(matrix) 형태로 사용한다. 즉, 이미지 센서의 픽셀 개수가 가로 방향으로 640개, 세로 방향으로 480개가 배열된 센서로부터 나온 영상의 크기는 480×640 크기의 행렬로 표현된다. 컬러 영상의 경우 R, G, B를 분리하여 표시하므로, 3×480×640의 3차원 텐서 형태로 표시한다. 영상의 해상도는 센서의 해상도에 따라서 결정되지만, 일반적으로 디스플레이의 규격에 따라서 640×480(SDTV), 2180×720(HD), 1920×1080(FHD), 3840×2160(UHD) 크기를 주로 사용한다.

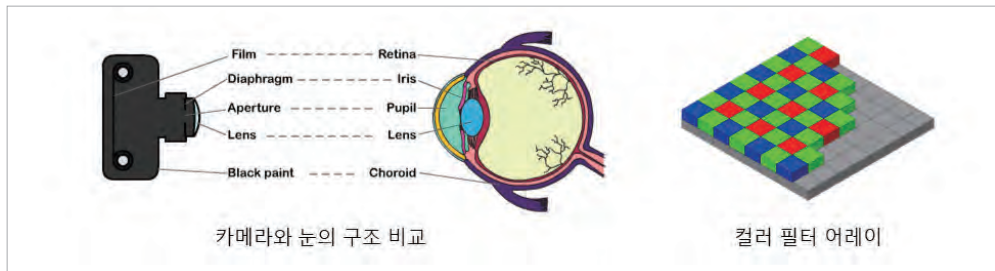


그림 10-2 카메라와 눈의 구조 및 컬러 필터 어레이

(<https://www.sciencewithme.com>, https://en.wikipedia.org/wiki/Color_filter_array)

Lidar(Light Detection and Ranging)는 거리를 측정하는 대표적인 센서이다. 센서에서 방출한 레이저가 물체에 반사되어 돌아오는 것을 감지하여 센서와 물체 사이의 거리를 측정한다. 방출한 신호와 감지한 신호를 이용하여 거리를 측정하는 방식에 따라 크게 두 가지 방식으로 라이다를 분류할 수 있다. 첫 번째로 비행시간(TOF, Time of Flight) 측정 방식이 있다. 이 방식은 빛이 방출된 시간으로부터 물체에 반사되어 돌아온 시간 차이를 이용하여 반사된 물체와의 거리를 계산한다. 이 방식으로 가까운 거리에서의 비행시간을 계산하기 위해서는 매우 정밀한 시간 측정 장치가 필요하다는 특징이 있다.

두 번째로, 위상차(Phase Shift) 방식은 방출한 빛과 감지한 빛의 위상차를 이용하여 거리를 측정한다. 이 방식은 ToF 방식과는 달리 비행시간이 아닌 위상차를 이용하므로, 정밀한 시간 측정이 필요하지 않다는 장점이 있는 반면, 위상차가 레이저 파형의 한 주기를 넘어가는 경우에 대해서는 판단할 수 없다는 단점이 있다.

라이다의 이러한 두 가지 방식은 모두 1차원에 대한 거리 값만을 구할 수 있다는 특징이 있다. 따라서 센서 주변의 2차원 또는 3차원 방향으로의 거리를 구하려면 다음과 같은 방식

을 적용할 수 있다. 바로 센서 배열의 차원을 확장하는 것과 센싱 방향을 바꾸어 가면서 반복적으로 측정하는 것이다. 1차원 센서를 한 열로 배열할 경우 2차원의 거리 정보를 획득할 수 있으며, 열과 행으로 배열할 경우 3차원 거리 정보를 획득할 수 있다. 또한, 1차원 센서의 거리 획득 방향을 좌, 우로 조금씩 회전시키면서 거리 정보를 획득하는 경우 2차원 거리 정보를 획득할 수 있으며, 이에 위아래 방향으로 회전시키는 것을 추가함으로써 3차원 거리 정보를 획득할 수 있다. 이때 직접적으로 센서를 회전하는 방식 대신, 센서 수신부와 송신부 전면 거울의 방향을 조절하여 빛의 진행 방향을 조절한다.

거리 정보를 데이터화하는 경우는 여러 가지 방식이 있지만, 가장 많이 사용되는 것은 깊이 지도(depth map)와 포인트 클라우드(point cloud) 방식이다. 깊이 지도 방식은 영상과 같이 2차원 행렬 형태로 데이터를 표현한다. 행렬의 행과 열은 각각 센서로부터 획득한 거리 정보의 방위각과 고도로 계산할 수 있고 픽셀 값은 거리 값을 의미한다. 영상과 깊이 지도가 모두 정형화된 행렬로 나타내지는 반면, 포인트 클라우드는 집합(set)으로 정보를 나타낸다. 즉, 센싱된 모든 점들의 삼차원 공간상에서의 x, y, z 값을 집합 형태로 표현한다. 예를 들어, 거리 센서로 1,000개의 서로 다른 방향에 대한 거리 값(반사된 지점을 포인트로 간주)을 측정하였다고 한다면, 이 각각의 포인트들은 순서가 없는 1000×3 의 집합 형태를 가진다.

최근에는 카메라와 라이다를 결합한 센서 또한 널리 사용되고 있다. 마이크로소프트사의 kinect와 인텔사의 Real Sense 등이 대표적인 예이다. 두 센서 모두, 이미지 센서와 거리 센서를 융합하여 RGB 영상과 깊이 지도를 동시에 획득할 수 있다. 이 밖에도, 특정한 패턴을 투사한 후 일반 카메라로 촬영을 하여 패턴 분석을 통해 거리 값을 계산하는 구조광(Structured light) 방식의 카메라도 사용된다.



그림 10-3 카메라와 라이다를 결합한 센서와 영상
(<https://www.microsoft.com>, <https://www.intel.com>)

1.2 데이터 전처리

센서로부터 입력된 데이터를 바로 사용하는 것은 몇 가지 문제점을 유발한다. 첫 번째로, 센서 데이터는 그 정보량에 비해 원시 데이터(raw data)의 크기가 크다는 특징이 있다. 이를 위해 유의미한 정보를 중심으로 데이터 양을 줄여줄 수 있다. 주성분 분석(PCA, Principal Component Analysis), 독립 성분 분석(ICA, Independent Component Analysis) 등을 통해 입력 데이터의 차원을 축소하는 방식이 이에 해당한다. 예를 들어, 300×300의 해상도를 가지는 흑백 영상은 90,000차원의 공간에서 한 점으로 표현된다. 이를 주성분 분석을 통해서, 데이터의 분포가 가장 큰 기저로 투영하여 차원을 축소할 수 있다.

데이터 크기를 축소하는 것 이외에도, 데이터의 품질을 개선하는 것이 데이터 전처리 단계에서 중요한 요소이다. 데이터 입력 과정에서 발생할 수 있는 노이즈를 제거하거나, 입력 데이터의 분포가 한 쪽으로 편중되어 있을 경우 이를 보정하는 것이 필요하다. 영상의 경우 밝기 조절, 대비 조절, 감마 보정 등이 이에 해당한다. 또한, 입력 데이터의 분포를 정규화(normalization) 하거나 표준화(standardization) 하는 것도, 비전 시스템의 성능 향상에 중요한 요소이다.

이와는 반대로, 기계 학습 등의 알고리즘을 사용하는 경우에는 전처리 과정을 통해서 데이터 양을 늘리는 방법을 적용하기도 한다. 하나의 입력 영상이 있으면, 색상 및 밝기 변화, 노이즈 추가, 크기 및 회전 등을 조절하여 유사한 데이터를 생성하여 학습에 사용하는데, 이를 데이터 증강(data augmentation)이라고 하며 넓은 의미로 보았을 때, 데이터 전처리에 해당한다고 볼 수 있다.

1.3 특징 추출 및 기술

데이터로부터 정보를 추정하는 데 있어서 가장 중요한 요소 중 하나는 데이터의 특징을 추출하는 것이다. 인간도 사물을 인지할 때, 사물의 전체적인 정보를 모두 이용하는 것이 아니라, 사물을 판별하는 데 필요한 특징들을 비교함으로써 수행한다는 것이 밝혀졌다. 이와 마찬가지로 비전 시스템은 서로 다른 환경에서 획득된 데이터 내에서 객체 고유의 특징을 추출하고 조합하여 다양한 역할을 수행할 수 있다.

특징 추출은 크게 특징 검출과 기술의 두 가지로 분류할 수 있다. 특징 검출은 데이터에서

특징이 있는 부분 또는 영역을 검출하는 것이고, 특징 기술은 이 부분이 어떤 특징을 가지고 있는지 수학적으로 기술하는 것이다. 인간도 이와 같은 방식으로 사물을 구분한다.

그림 10-4에서 사람이 영상 내의 물체를 에펠탑이라고 인식하는 이유에 대해 역으로 살펴보자. 에펠탑은 객체의 모양상 다른 건축물과 차별되는 특징적인 부분이 있고, 이러한 특징들은 서로 다른 환경에서 다른 자세로 획득한 영상에서도 반복적으로 나타난다. 우리는 이러한 객체의 특징들을 사전에 알고 있는 특징들과 비교하여 해당 객체가 에펠탑임을 인지한다.

물체 인식뿐만 아니라, 데이터 정합에서도 특징은 중요한 역할을 한다. 그림 10-4의 오른쪽 그림과 같이 똑같은 환경에서 획득한 두 장의 영상이 있고, 이를 서로 통합하려고 할 때 단순히 영상을 이어 붙이는 것으로는 해결되지 않는다. 이때 사용하는 방법은 서로 다른 영상에서 검출한 특징들 중 동일한 특징이 겹쳐지도록 함으로써 데이터를 정합할 수 있다. 이는 포인트 클라우드의 정합에서도 같은 방식으로 적용될 수 있다.



그림 10-4 특징 검출과 데이터 정합 (M. Brown and D. G. Lowe. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features, IJCV, 2007)

앞서 말했듯이 특징 추출은 특징 검출(extraction)과 특징 기술(description) 두 가지 단계로 나눌 수 있다. 특징 검출은 물체 또는 데이터에서 특징적인 점 또는 영역을 검출하는 방식이다. 이때, 특징점으로 지정될 수 있는 후보는 몇 가지 조건을 만족해야 한다. 첫 번째 조건은 두드러짐(Saliency)이다. 예를 들어, 직선상에 존재하는 한 점은 직선상의 다른 점들과 차별성이 없어 특징점으로 사용될 수 없다. 따라서, 일반적인 특징점은 꼭지점(corner) 또는 폐곡

선(blob) 영역이 주로 사용된다.

두 번째로, 특징점은 반복성(repeatability)이 있어야 한다. 같은 물체의 점이지만 영상에 따라서 나올 수도 있고 그렇지 않을 수도 있는 영역은 특징점으로서의 역할을 수행할 수 없다. 이와 마찬가지로, 영상 내에서 물체의 크기가 변하거나 회전하는 등의 변화에도 항상 검출될 수 있는 영역이 특징점으로 적합하다.

특징점을 추출하였다고 해서 이를 바로 사용할 수 있는 것은 아니다. 한 영상의 특징이 다른 영상에서 다수의 특징들 중 어떤 점과 같은 것인지 비교하기 위해서는 이러한 특징점 또는 특징 영역에 대한 설명(description)이 필요하다. 따라서 모든 특징점은 특징점을 설명하는 디스크립터를 가지고 있고, 특징들의 비교는 이들 디스크립터들의 비교를 통해서 이루어진다.

영상의 경우는 특징점 추출을 위해서 Harris Corner, FAST(Features from accelerated segment test)와 같은 코너 검출 방식 또는 LoG(Laplacian of Gaussian), DoG(Difference of Gaussian) 등의 물방울(blob) 또는 폐곡선 검출 방식이 사용된다. 특징점에 대한 기술자를 생성하는 방식으로는 Hog(Histogram of Oriented Gradients), SIFT(Scale-Invariant Feature Transform), SURF(Speed-Up Robust Feature) 등의 방식을 사용하며, 이 방식은 모두 특징점 주변의 밝기 변화 값을 벡터화하여 기술자로 만드는 방식을 이용한다.

포인트 클라우드의 경우, 영상에 비해서 특징점을 추출하는 것이 까다롭다. 그 이유는, 영상은 밝기 값의 변화량을 기반으로 하여 특징점을 검출하고 기술하는 반면, 포인트 클라우드는 3차원 공간상 점의 위치 값만 가지고 있을 뿐, 밝기 값에 대한 정보는 없기 때문이다. 따라서, 포인트 클라우드의 특징은 포인트들의 기하학적 해석을 통하여 검출하고, 주변 점들과의 위치 관계를 통하여 기술자를 생성한다. FPFH(Fast Point Feature Histogram)는 3차원의 포인트 클라우드를 기반으로 특징 검출 및 기술자를 생성하고, NARF(Normal Aligned Radial Feature)는 깊이 지도상에서 특징 추출과 기술자 생성을 하는 방식이다.

1.4 분류

획득한 데이터로부터 얻어진 특징들을 통해서, 해당 데이터를 분류하는 방식은 크게 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 첫 번째는, 데이터로부터 얻어진 특징들을 현재 데이터베이스에

저장된 특징들과 비교(matching)를 하여 가장 가까운 특징 쌍들을 찾아내는 방식이다. 예를 들어, 영상 내의 사람 얼굴에서 획득한 N 개의 특징들에 대한 기술자들을 데이터베이스에 저장된 10명의 특징과 비교하여 가장 차이가 적은 특징을 가진 사람의 얼굴로 판단하는 것이다. 추출된 특징들을 기술하는 가장 간단한 방식으로는 특징점 주변의 픽셀들의 패치를 벡터화하여 추후 비교 시 SAD(Sum of Absolute Differences), SSD(Sum of Squared Differences), NCC(Normalized Cross Correlation) 등의 템플릿 매칭을 이용하는 방식이 있다. 이 외에도, 기술된 특징 벡터들을 서로 비교하여 최소 거리를 가지는 클래스를 찾는 방식도 사용된다.

특징들을 분류하는 두 번째 방식은 특징으로부터 클래스 값을 추정하는 함수를 이용하는 것이다. 즉, 추출된 특징들을 x 라고 하고 해당하는 클래스 라벨을 y 라고 했을 때, $f(x)=y$ 를 만족하는 함수 f 를 이용하는 것이다. 이 함수는 직접 설계하여 사용할 수 있지만, 직관적이지 않은 특징 벡터로부터 라벨을 유도하는 모델을 직접 만들어 내는 것은 어렵다. 그러한 이유로, 분류 함수 f 를 만들기 위해 주로 기계 학습 방식을 이용한다. SVM(Support Vector Machine), NNs(Neural Networks) 등을 이용하여 추정된 y 가 실제 라벨 값과 가장 가까워지도록 지도학습 등의 방식을 사용하여 f 함수를 추정하는 방식을 사용한다.

1.5 심층 신경망 기반 시스템

앞선 절에서 설명한 바와 같이 과거에는 비전 시스템에서 특징들을 분류하는 목적으로 기계학습을 사용해 왔다. 그러나 데이터 양의 증가, 병렬 처리 능력의 증가, 새로운 학습 모델의 등장 등으로 분류뿐만 아니라, 전처리, 특징 검출 및 기술 등의 대부분 역할을 수행하고 있다. 이처럼 원시 데이터가 입력으로 주어졌을 때, 분류 결과가 출력으로 나오는 방식을 엔드투엔드(End-to-End) 방식이라고 한다.

심층 신경망은 여러 개의 퍼셉트론이 은닉 계층(hidden layer)을 구성하고, 여러 개의 은닉 계층들이 이전 계층 결과를 입력으로 받아서, 새로운 출력값을 다음 계층으로 전달하는 방식이다. 이때, 센서 데이터에 가까운 레이어는 주로 좁은 영역(receptive field)에서 간단한 특징을 추출하고, 출력값에 가까운 계층일수록 특징들을 조합하여 새로운 복잡한 특징을 구성한다. 따라서, 새로운 데이터셋을 학습하기 위해 처음부터 학습을 하지 않고 기존 학습된 모델에서 후반부 은닉 계층의 가중치만 학습하는 방식으로도 우수한 인식 성능을 도출해 낼

수 있으며 이를 전이학습(transfer learning)이라고 한다.

2. 비전 인식

다음으로는 비전 시스템을 이용하여 수행되는 다양한 역할들을 특성에 따라 분류하고, 대표적인 모델에 대해서 설명한다.

2.1 물체 인식

물체 인식은 로봇 시스템의 전방 및 주변부 환경의 객체를 인식하는 것을 의미한다. 물체 인식은 추출하는 정보에 따라서 물체 분류(classification), 물체 검출(detection), 6 자유도 자세 추정(6 DoF Pose Estimation), 영역 추출(Segmentation)로 구분할 수 있다.

물체 분류는 센서 데이터에 포함되어 있는 객체의 종류를 분류하는 것이며 한 개의 클래스를 추정하는 것이 일반적이다. 카메라로부터 획득된 영상이 입력으로 들어왔을 때, 개인 지 고양이인지 판별하는 것이 물체 분류의 예라고 할 수 있다. 물체 분류는 심층 신경망의 관점에서 보았을 때 가장 기본적인 구조를 가지며, 특징 추출 및 분류로 구조를 구분할 수 있다.

물체 분류를 위한 공개 데이터셋으로는 MNIST, CIFAR-10, ImageNet 등이 있다. 이 중에서 ImageNet은 대표적인 대규모 데이터셋으로 1,400만 장 정도의 라벨링된 데이터셋을 가지고 있으며 1,000개의 객체 클래스를 가지고 있다. ImageNet을 이용한 물체 분류 경진대회인 ILSVRC(ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge)를 통해 매해 우수한 성능의 심층 신경망 알고리즘이 발표되었다. 대표적인 모델로는 AlexNet, VGG, Inception, ResNet, DenseNet, MobileNet 등이 있으며 이 모델들은 물체 분류뿐만 아니라, 검출, 자세 추정, 영역 추출 및 생성 모델(Generative model)의 기반 네트워크(backbone network)로도 사용된다. 또한 포인트 클라우드 기반의 분류 모델로는 PointNet이 있다.

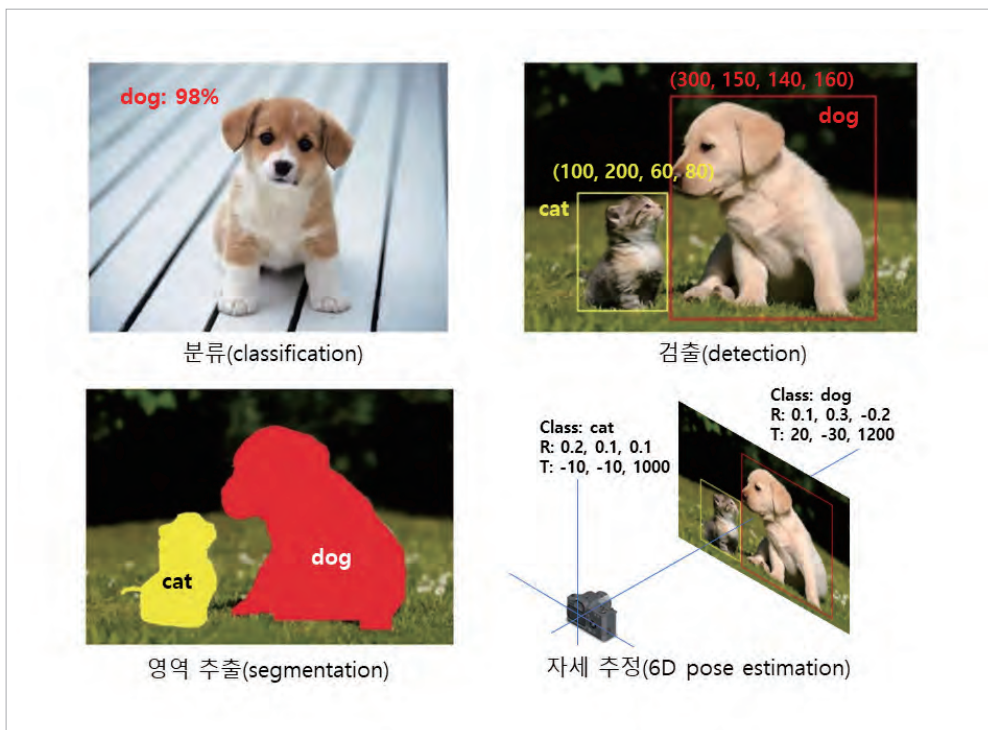


그림 10-5 물체 인식 (<https://bdtechtalks.com/2021/05/07/attendseg-deep-learning-edge-semantic-segmentation/>)

물체 검출은 물체 분류를 포함하는 개념이지만, 다음의 두 가지 측면에서 차이점이 있다. 첫 번째로, 입력 데이터 내의 모든 객체를 검출한다는 차이가 있다. 즉, 물체 분류가 결과가 1개의 값을 가진다면, 물체 검출은 0~N개의 결과값을 가지게 된다. 두 번째로, 물체 검출은 단순히 데이터 내에 존재하는 객체의 위치까지 추정한다. 이를 경계 영역(bounding box)라고 하며, 영상에서는 사각형으로, 포인트 클라우드에서는 육면체로 나타난다. 물체 검출은 CCTV, 스마트폰, 자율 주행 차량, AR/VR 등 비전 센서를 이용하는 대부분의 분야에서 사용되고 있다.

물체 검출 방식은 1-단계(single stage), 2-단계(two-stage)로 분류할 수 있다. 1-단계 방식은 영상을 구획으로 나누어 해당 구획마다 가장 확률이 높은 물체의 종류와 경계 영역 후보를 추정하는 방식으로, 검출 속도가 매우 빠르다는 장점이 있다. YOLO, SSD 등의 모델이 이에 해당한다. 2-단계 방식은 먼저 물체인지 확률이 높은 영역을 추출하고, 추출된 영역을 분류하는 단계로 구성되어 있다. 이 방식은 1-단계 방식에 비해서 수행 속도는 느리지만, 정확도

가 높다는 특징이 있다. Fast R-CNN, Faster R-CNN 등이 2-단계 검출 방식의 대표적인 모델이다.

6 자유도 자체 추정은 입력 데이터에서 물체의 종류와 영상 내에서의 위치뿐만 아니라 3차원 공간상에서 이동(translation) 및 회전(rotation)으로 구성되는 자세(pose)를 추정하는 것을 의미한다. 원칙적으로 2차원으로 투영된 영상의 정보만을 이용하여 3차원의 정보를 복원하는 것은 불가능하다. 따라서, 미리 알고 있는 객체의 크기 정보를 이용하거나, 거리 센서 등을 융합하여 해당 목적을 달성한다. 현재 우수한 성능을 나타내는 모델로는 PoseCNN, SegDriven, PVNet 등이 있다.

영역 추출(segmentation)은 객체의 경계 영역(bounding box)을 추정하는 것 또는 픽셀 단위의 분류(classification)를 수행하는 것을 의미한다. 영상일 경우 모든 픽셀이 어떤 종류인지, 포인트 클라우드의 경우 모든 포인트들이 어떤 객체에 속하는지 분류하는 것이다. 이것은 객체의 정확한 외곽선을 추출하는 것과 비슷한 결과를 보인다. 영역 추출에서 해당 데이터 내의 동일한 종류의 객체가 여러 개 존재할 때, 이들을 구분하지 않고 하나의 종류로 분류하는 것을 의미적 영역 추출 (semantic segmentation)이라고 하고, 동일한 종류의 객체일지라도 각각 따로 분류하는 것을 개체 영역 추출(instance segmentation)이라고 한다. 영역 추출을 위한 많은 방식이 제안되어 왔지만, 심층 신경망을 이용하는 모델로는 U-Net, FCN 등이 있다. 이들은 입력 데이터로부터 특징을 추출하여 단위 영역당 분류를 진행한 후에 크기를 키워가며 세부적인 분류를 진행하는 방식을 사용한다.

2.2 얼굴 및 자세/행동 인식

로봇이 인간과 상호작용하기 위해, 인간의 얼굴을 인식하여 신원을 식별하고 인간의 행동을 분류하는 것은 매우 중요하다. 심층 신경망을 이용하여 사용자 또는 주변 환경에서 인간 얼굴 인식 및 자세, 행동 인식을 수행하는 많은 방법들이 연구, 개발되어 왔다.

물체와 마찬가지로, 얼굴 인식을 위해서는 입력 데이터에서 얼굴 영역을 검출하고 검출된 영역 내의 데이터로 식별을 수행하는 방식을 사용한다. 얼굴 인식이 물체 인식과 유사한 방법론을 사용하는 반면, 풀고자 하는 문제는 다르다. 물체 인식은 서로 다른 특징들을 지닌 물체들을 식별하는 것으로, 물체들은 서로 다른 특징들을 가지고 있다. 이에 반해 얼굴 인식

은 기본적으로 눈, 코, 입 등과 같은 똑같은 특징이 유사한 위치에서 검출되며, 이들 유사한 특징 간의 세부적인 차이를 통해서 분류하게 된다.

영상 기반의 2차원 얼굴 인식 방법과 깊이 센서 등으로부터 획득한 정보를 융합하여 3차원상에서 얼굴을 인식하는 방식이 있다. DeepID, FaceNet 등이 대표적인 2차원 기반 얼굴 인식 모델이며, 3DMM, VRN 등은 3차원 기반의 얼굴 인식 네트워크이다.

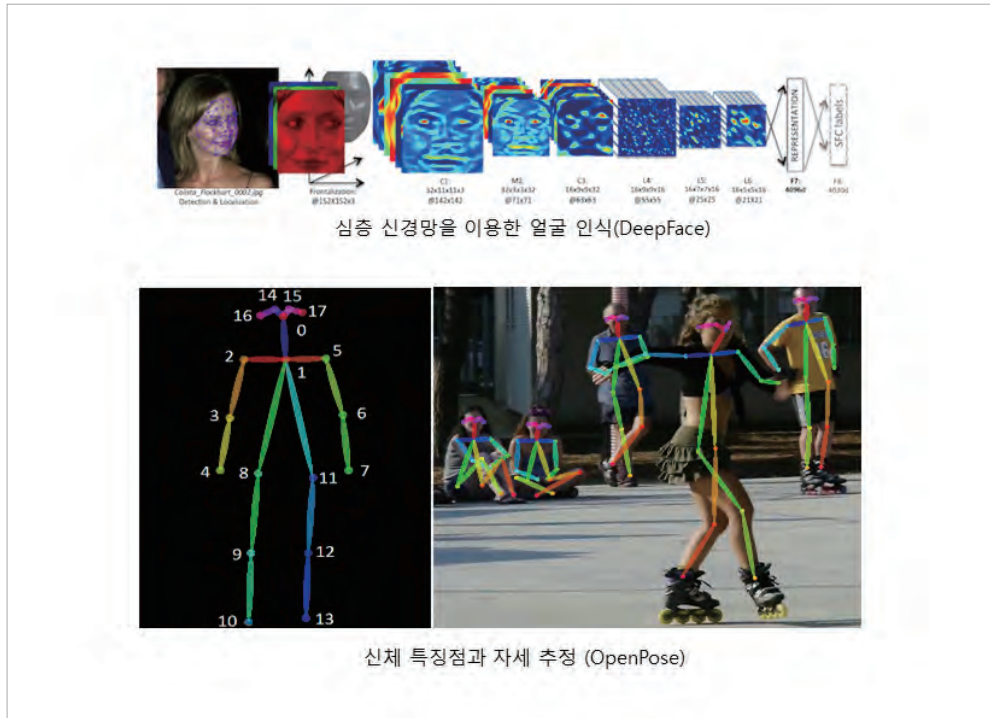


그림 10-6 얼굴 및 자세 인식 (<https://computervisiononline.com/blog/deepface-facebooks-face-verification-algorithm>, <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>)

자세 및 행동 인식은 인간 신체의 자세를 추정하거나, 연속된 데이터 시퀀스에서 행동을 추정하는 것을 뜻한다. 기본적으로 사람의 신체를 여러 부분이 연결된 객체라고 가정하고 이들 신체 부분이 연결된 관절(joint) 또는 신체의 특정 부위의 위치를 특징점으로 지정하여 이들 특징점을 추정하는 방식으로 자세를 추정한다. 동영상과 같은 데이터에서는 연속된 프레임에서 특징점들을 추적하여 걷기, 뛰기, 인사 등의 행동을 분류할 수 있다. 카네기 멜론 대학에서 개발한 오픈포즈(OpenPose)는 얼굴 표정, 신체 특징점 등을 추정할 수 있는 대표적

인 라이브러리이다.

2.3 3차원 복원

비전 센서로는 센서 주변 환경 중 일부 영역에 대한 데이터는 획득하지 못한다는 특징이 있다. 카메라 같은 경우 센서의 중심으로 화각(Field of View)에 해당하는 범위에서 빛의 정보를 획득할 수 있고, 라이다의 경우에도 정해진 방위각, 고도 내에서 정보를 획득한다. 또한, 자율 주행 차량, 이동식 로봇 등은 넓은 환경을 이동하며 획득한 데이터를 이용하여 전체 환경을 복원할 수 있다.

카메라로 획득된 영상은 2차원으로 차원이 축소되었기 때문에, 단일 데이터만 이용해서는 3차원 정보를 복원할 수 없다. 그렇지만, 서로 다른 곳에서 획득한 영상을 삼각법에 기반한 역투영을 통해 3차원으로 복원할 수 있고, 이를 확장하여 여러 장의 영상을 역투영하여 주변 환경의 3차원을 복원하는 방식이 사용되며, 이를 SfM(Structure from Motion)이라 한다. 포인트 클라우드 형태의 데이터는 이미 3차원 정보를 가지고 있지만, 전체 환경을 복원하기 위해서는 부분적으로 취합된 포인트 클라우드를 연결해야 한다. 이를 포인트 클라우드 정합(registration)이라고 한다.

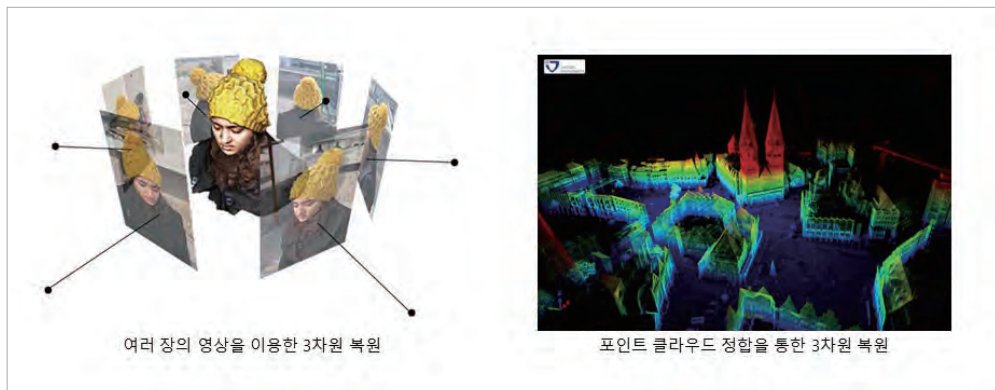


그림 10-7 3차원 복원 (<https://triayaam.com/index.php/neitra-3d-pro/features/>, <http://slam6d.sourceforge.net/>)

2.4 지도 작성 및 위치 인식

자율 주행 등에서 비전 시스템의 중요한 역할 중 하나는, 주변의 지도를 스스로 작성하고 그 가운데 위치를 파악하는 것이다. 현재 주행 중인 환경의 지도를 가지고 있다면, 영상 비교 등을 통하여 현재의 위치를 파악하는 것은 어렵지 않다. 반대로, 현재 센서의 위치를 정확하게 알고 있다면 앞선 절에서 설명한 3차원 복원 등의 방법을 이용하여 주변 지도를 작성할 수 있다.

그렇지만, 아무런 사전 정보가 주어지지 않은 경우에는 지도를 작성하고, 동시에 현재 위치를 파악하는 것은 매우 어려운 일이며, 이런 문제를 해결하는 방식을 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)이라고 한다. SLAM의 종류로는 단일 또는 스테레오 카메라로부터 획득한 영상을 이용하여 지도 작성 및 위치 추정을 하는 Visual SLAM을 비롯해 ORB SLAM, CCM SLAM 등의 방식이 있다. 카메라 이외에 깊이 센서, 모터 인코더 등의 다른 센서와 융합하여 수행하는 경우에는 좀 더 성능이 향상될 수 있다. 거리 센서를 융합한 RGBD SLAM과 모터 IMU 등의 센서를 결합한 Visual-Inertial SLAM 방식이 있다.



그림 10-8 Visual SLAM (<https://vision.in.tum.de/research/vslam>)

II

협동 로봇 안전 요구조건 및 안전 제어



최근 들어 세계 산업현장에서 일어나고 있는 4차 산업혁명은 생산, 제조, 서비스 등의 모든 산업 분야에서 일어나고 있는 일련의 혁명적 기술 혁신을 가리킨다. 그 본질과 개념에 대해서 다양한 설명이 가능하지만 크게 나뉘어 두 가지 분야 즉, 인지, 학습, 판단과 관련된 분야의 지능 혁명과 행동(물리적 상황 변화)이 발생하는 분야에서 로봇의 역할 증대로 설명할 수 있다.

인간의 인식, 판단, 행동을 보조하던 과거의 로봇 사용 양식을 넘어서 이제는 로봇이 인간을 온전히 대신할 수 있는 시대로 넘어가는 문턱에 들어섰다. 이러한 인지, 로봇 혁명의 흐름과 더불어 로봇산업에 나타나고 있는 또 하나의 큰 흐름은 바로 로봇과 인간이 작업 공간을 공유하는 시대로의 전환이다. 이러한 공간 공유 형태의 작업을 우리는 (인간과 로봇의) 협동 작업(Collaborative Operation)이라고 부르고, 이러한 작업에 사용되는 로봇을 협동 로봇(Collaborative Robot)이라고 부른다.

최근까지 로봇은 인간의 작업 공간과 엄격하게 분리된 로봇만의 작업 공간에서 사용되어 왔으며, 이러한 공간분리형 작업에서 인간의 안전에 대한 위험성은 비교적 쉬운 기술적 조치로 해결할 수 있었다. 그러나 인간과 로봇이 공간을 동시 또는 순차적으로 공유하는 경우에 인간과 로봇의 충돌 가능성은 상존할 수밖에 없으며, 이러한 가능성으로 인한 안전 이슈가 이전의 공간분리형 로봇에 비해 더 복잡한 형태로 나타나게 되었다. 인간과 로봇의 협동 작업은 4차 산업혁명의 지향점에 해당하는 무인화, 완전 자율화를 향해가는 필수적인 과도기이자, 미래 로봇사회의 한 단면이기도 하다.

이번 장에서는 안전한 협동 작업을 위해서 요구되는 로봇의 안전 요구조건과 이 조건들을 만족하는 로봇 제어 방법에 대해서 학습하고자 한다. 특히 의도되거나 의도되지 않은 로봇과 인간의 충돌/접촉과 관련된 위험성을 분석 평가하고, 충돌/접촉을 위험하지 않도록 제어하는 기술에 대해서 주로 설명하고자 한다.

로봇의 안전 요구조건은 국제표준기구 ISO에서 세계 로봇전문가들이 모여 오랜 시간 동안 토론하고 협의한 끝에 도출된 국제표준문서에 잘 설명되어 있으며, 로봇 안전 요구조건 이해를 위해서는 이 국제표준문서의 내용에 대한 이해가 시작이고 끝이라고 할 수 있다. 따라서, 로봇 안전관련 국제표준문서에 대한 내용도 이 장에서 함께 다루도록 하겠다.

1. 협동 로봇

2008년에 시장에 선보인 Universal Robots의 UR 시리즈가 2013년에 독일의 V 자동차 공장에 설치된 것이 세계 최초로 대량생산 공정에 설치된 인간-로봇 협동 작업용 로봇의 사례로 알려져 있다.



그림 11-1 2013년 세계 최초로 대량생산 공정(독일 V사)에 설치된 협동 로봇 UR
(<https://blog.robotiq.com/bid/71494/Universal-Robots-Release-their-New-Generation-of-Collaborative-Robots>)

그림 11-1에서 볼 수 있는 작업 환경과 그림 11-2에 있는 전통적인 공간분리형 작업 방식

을 비교하면 협동 로봇과 기존의 산업용 로봇의 장단점 비교가 명확해진다. 공간분리형 로봇의 경우, 인간과 로봇의 작업 공간을 분리하기 위한 방호벽을 설치하기 위한 추가 공간 확보가 필요하다. 이러한 이유로 인해 이미 로봇 사용을 고려해서 설계된 생산/작업 라인이 아니라면, 기존의 생산/작업 라인에 작업자를 대신해서 로봇을 추가로 설치하기란 매우 어렵다. 이러한 공간분리형 작업 형태는 로봇의 안전성에 대한 기술적 경제적 요구사항을 만족하기 어려운 여건에서 불가피하게 선택되어 사용된 방식으로, 공간분리를 전제로 설계된 작업 공정은 인간의 장점을 적극적으로 활용하는 인간-로봇 협동 작업의 가능성을 원천차단하여 로봇 활용성을 제한하고 있다.



그림 11-2 공간분리형 로봇의 설치 운영 사례 (<http://www.robotunits.com.au/category/safety-fencing/>)

기존 산업용 로봇의 사용 방식이 갖는 단점에 비해 공간공유형 협동 작업이 갖는 장점은 명확하다. 그림 11-3에 두 사용 방식을 비교하였다. 다만, 협동 작업의 이러한 장점 활용은 공간공유로 인해 발생할 수 있는 인간-로봇 접촉/충돌 가능성에 대한 충분한 안전성 확보를 전제로 한다.

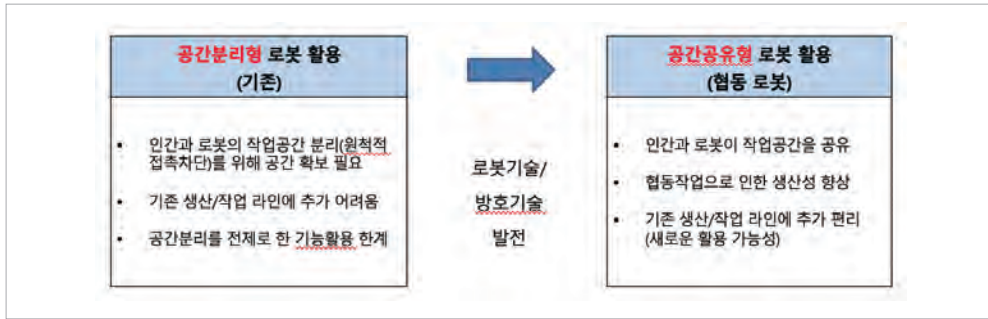


그림 11-3 공간분리형 로봇과 공간공유형(협동) 로봇의 장단점 비교

과연 어떻게 하면 협동 작업에서 로봇을 안전하게 사용할 수 있는가? 이 질문에 답하기 위해서는 ‘안전’이란 개념을 명확하게 이해할 필요가 있다.

2. 안전, 위험성 기본 개념

우리가 로봇이 안전하다고 얘기할 때, ‘안전’은 과연 무슨 의미인가? 국제표준기구 ISO는 여러 산업분야에서 생산되고 사용되는 다양한 기계/기구류의 안전성에 대해서 이렇게 정의하고 있다.

- **안전하다:** 감내할 수 있는 위험성(Tolerable risk)만 존재한다. 또는, 감내할 수 없는 위험성이 존재하지 않는다.

그리고 위험성을 다음과 같이 정의하고 있다.

- **위험성(risk):** 발생 가능한 상해의 심각성과 발생 가능성의 조합

위험성에 대해서 보다 구체적인 설명을 하기에 앞서 ‘감내할 수 있는’이라는 개념에 대해서 생각해보기로 하자. 그림 11-4에는 한 가지 스포츠 사례가 제시되어 있다. 이 종류의 스포츠에서는 때때로 매우 심각한 부상이 발생하며 심지어 치명적인 부상이 발생하기도 한다. 그럼에도 불구하고 우리 사회 구성원과 법 체계는 이러한 스포츠를 인정하고 시행되도록 허용하고 있다. 만약 이런 정도의 상해와 사망사고를 일으키는 산업기계가 있다면 과연 그 기계의 사용이 허용될 수 있을까?



그림 11-4 위험하지만 사회적으로 용인되고 허용되는 (감내되는) 스포츠 사례

(<https://www.pressdemocrat.com/article/sports/high-school-football-in-california-no-longer-a-boon-to-pac-12/>)

여기서, ‘감내할 수 있는’이라는 개념에는 사회성, 시대성, 경제성 등의 요소가 작용한다. 감내할 수 있는 위험 수준은 시대별, 나라별, 산업별로 달라질 수밖에 없으며, 어느 수준을 용인할 것인가에 대한 답을 얻기 위해 최고의 전문가들이 모여서 논의하고 타협하여 그 수준을 정하게 된다. 이런 과정이 안전관련 표준, 법제도를 만드는 과정이다. 로봇안전표준도 관련된 전문가들(제조사, 사용자, 관련 부품사 등)이 모여 감내할 수 있는 위험성 수준을 정하고 이를 문서화하였다. 그래서 표준은 시대에 따라, 기술 발전에 따라 변화할 수밖에 없다.

이제 위험성의 정의를 좀 더 자세히 들여다보겠다. 위험성을 구성하는 요소는 상해의 심각성과 상해 발생 확률이다. 이 내용을 제대로 이해하기 위해서는 다음과 같은 기본 개념에 대한 이해가 필요하다. 즉, 위험성은 인체에 상해가 발생하는 가능성과 그 상해의 심각성을 가리키는 개념이다. 만약 인간의 상해가 관련되지 않은 사건이라면 위험성, 안전성을 논의하는 것이 부적합하다.

- **상해(harm):** 신체적 부상이나 건강상의 손실(Physical injury or damage to health)
- **위험원(hazard):** 잠재적인 상해의 근원(Potential source of harm)
- **위험 상황(hazardous situation):** 작업자가 적어도 한 가지 이상의 위험원에 노출되는 상황. 노출 결과 상해는 즉시 또는 오랜 시간을 두고 나타날 수 있다.

■ **위험한 사건(hazardous event):** 상해를 일으킬 수 있는 사건

상해의 심각성은 만약에 위험한 상황에서 상해가 발생한다면 그 상해는 경증, 중증, 치명 상 중 어떤 것인가를 말한다. 상해 발생 확률은 조금 더 세분화된 확률들의 조합으로 구성되어 있는데, 위험원에 노출될 확률, 위험한 사건이 발생할 확률(위험원에 노출된다고 해서 항상 위험한 사건이 발생하는 것은 아니다), 위험한 사건이 일어났음에도 불구하고 상해 발생을 회피 할 수 있는 확률(위험한 사건이 일어났다고 해서 항상 상해가 발생하는 것은 아니다) 등의 조합으 로 구성된다(그림 11-5 참조).

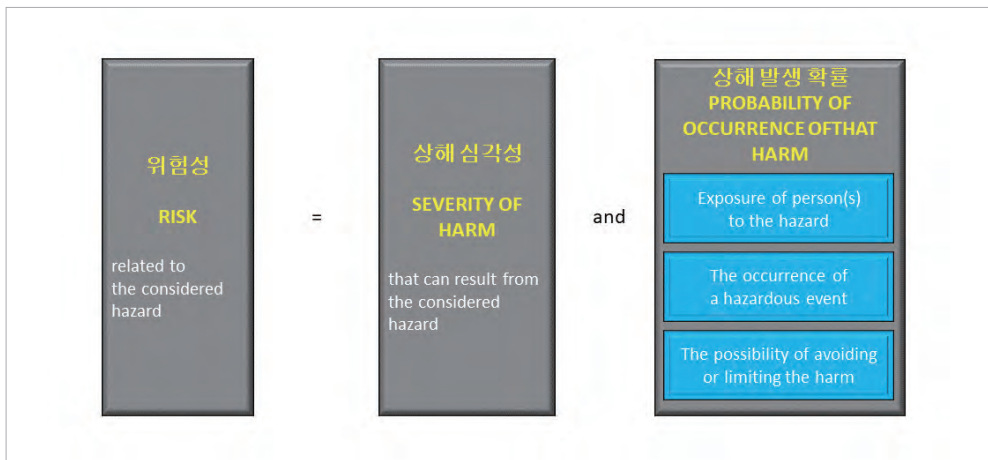


그림 11-5 ISO12100에서 정의한 위험성

그림 11-6에 나타난 상황에 이러한 위험성 개념을 적용해 보자. 즉, 사람이 빙판길을 걸어 가는 작업을 진행한다. 이때 빙판길은 위험원, 빙판길 위를 걷는 것은 위험한 상황, 걷다가 넘어지는 것은 위험한 사건이 된다. 이때 위험성은 이렇게 정의된다. 즉, 빙판길 위를 걸어가 다 넘어지는 성인(노약자, 어린이) 중에 10%(70%, 5%)는 중증 골절상을 입는다. 이 위험성은 감내할 만한 수준인가?



그림 11-6 감내할 수 있는 위험성 여부의 판단 사례
(<https://www.pinterest.co.kr/pin/331014641337052600/>)

로봇을 사용하는 전 과정(설치, 사용, 유지/보수, 폐기)에서 노출될 수 있는 모든 위험원과 위험한 상황, 위험한 사건에 대해서 위험성을 분석하고 그에 대한 감내 여부를 판정하는 것을 바로 위험성 평가(Risk Assessment)라고 한다.

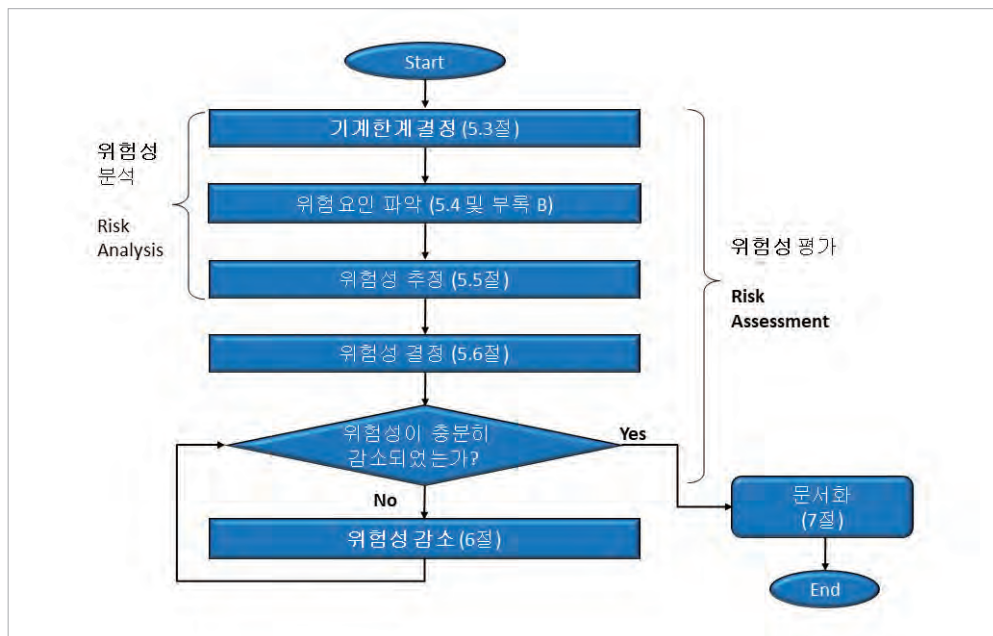


그림 11-7 위험성 평가 절차 (KS B ISO 12100)

위험한 사건에 대해서 위험성을 평가하고 만약 그 위험성이 감내할 수 있는 수준을 넘어선다면, 위험성을 감소하기 위한 조치를 취해야 한다. 즉, 위험원을 제거하거나, 위험원에 노출될 확률을 낮추거나, 상해 발생을 회피할 수 있는 가능성을 높이거나, 발생하는 상해가 경미한 수준이 되도록 하는 조치를 취해야 한다.

ISO 12100에서 위험성 감소 절차는 반드시 본질적 안전설계조치(1단계), 방호조치 및 추가적 방호조치(2단계), 사용 정보(3단계)의 순서로 진행할 것을 요구하고 있다. 그림 11-7은 ISO 12100을 받아들여 작성된 KS표준(KS B 12100)에 수록된 이와 관련된 내용이다. 즉, 맨 처음에 수행되는 본질적 안전설계조치 단계에서는 위험원을 제거하여 본질적으로 위험한 상황이 일어나지 않도록 만들 수 있는지 검토하고, 그렇게 하는 것이 불가능하거나 비경제적일 경우 방호조치 및 추가적 방호조치를 강구한다. 2단계를 거친 후에도 위험성이 감내할 수준에 도달하지 못했다면, 사용설명서, 작업지시서 경고등 등의 사용 정보를 활용하여 위험성을 감소하는 방법을 강구한다(그림 11-8 참조).

- **설계상의 대책(inherently safe design measure)**: 보호 장치를 활용하는 대신에 설계 또는 기계의 작동 특성을 변경하여 위험을 제거하거나 위험성을 감소시키는 보호 대책
- **방호조치(safeguarding)**: 설계상의 대책을 활용해서 위험을 충분히 제거하거나 위험성을 충분히 감소시키지 못하는 경우 안전장치를 활용하여 작업자를 보호하기 위한 보호 대책
- **추가적 방호조치(complementary protective measure)**: 위험성 감소 달성을 목적으로 수행하는 추가적 조치
- **사용 정보(information for use)**: 전달 매체(문서, 단어, 표시, 기호, 신호, 선도 등)로 구성되는 보호 대책으로서, 개별 또는 조합으로 사용되어 사용자에게 정보를 전달

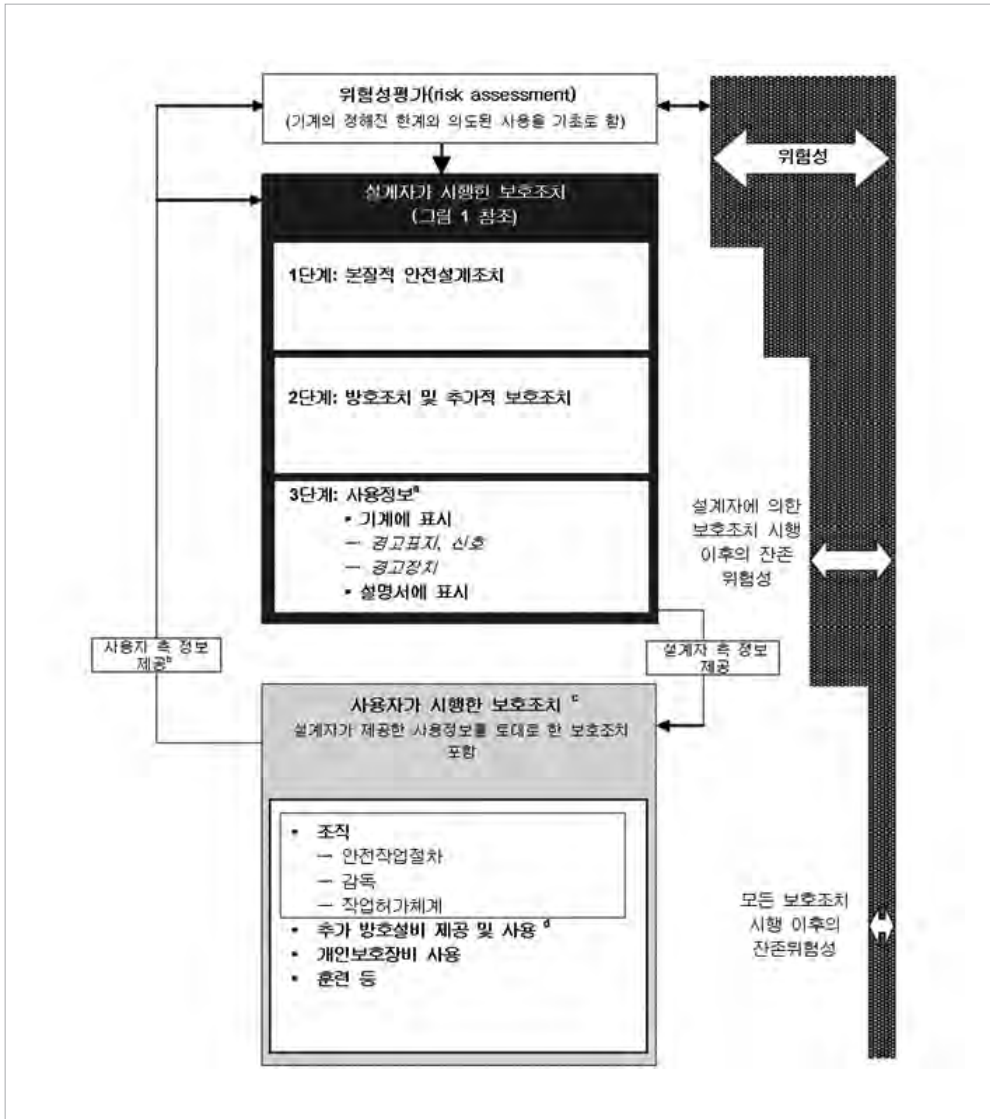


그림 11-8 위험성 감소 절차 (KS B ISO 12100)

ISO 12100에서 인식하고 있는 위험원에는 다음과 같은 종류가 있다.

- 기계적 위험원 (mechanical hazard)
- 전기적 위험원 (electrical hazard)
- 열적 위험원 (thermal hazard)

- 소음 관련 위험원 (hazards generated by noise)
- 진동 관련 위험원 (hazards generated by vibration)
- 방사 관련 위험원 (hazard generated by radiation)
- 재료, 물질 관련 위험원 (hazards generated by materials and substances)
- 인간 공학적 원리의 무시에 따라 발생하는 위험원 (hazards generated by neglecting ergonomic principles)
- 미끄러짐, 걸림, 낙하 위험원 (slipping, tripping and falling hazards)
- 위험원의 조합 (hazard combinations)
- 기계가 사용되는 환경과 관련된 위험원 (hazards associated with the environment in which the machine is used)

3. 협동 로봇 안전 요구조건

이러한 위험성 분석, 위험성 평가, 위험성 감소 개념을 로봇에 적용한 문서가 바로 산업용 로봇 안전 요구조건 표준이다. 산업용 로봇과 관련된 안전 요구조건 국제표준은 다음과 같이 3개가 발행되었다.

- **ISO 10218-1:** 2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robot
- **ISO 10218-2:** 2011 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 2: Robot systems and integration
- **ISO/TS 15066:** 2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots

여기서 눈여겨봐야 할 부분은 로봇과 로봇 시스템을 구분해서 표준이 작성된 점이다. 국제표준에서는 그림 11-9와 같이 로봇과 로봇 시스템을 구분한다. 로봇은 관절과 구동부 등으로 구성된 기구학적 연결 구성체이며, 로봇에 도구 하나라도 추가되는 순간 로봇 시스템이 구성되는 것이다. 로봇 시스템은 정확히는 ‘로봇+도구+주변기기+주변 환경(장애물 포함)’이라고 정의된다. 이러한 구분에 의하면 로봇이 갖는 위험원, 위험 상황, 위험성은 로봇 시스템이 갖는 위험원, 위험 상황, 위험성과 다를 수밖에 없다. 예를 들어 매우 날카로운 도구를

사용하는 경우를 상상해보면, 로봇은 안전하게 제작되었어도 날카로운 도구가 포함된 로봇 시스템은 안전하다고 볼 수 없는 상황이 될 수도 있다.

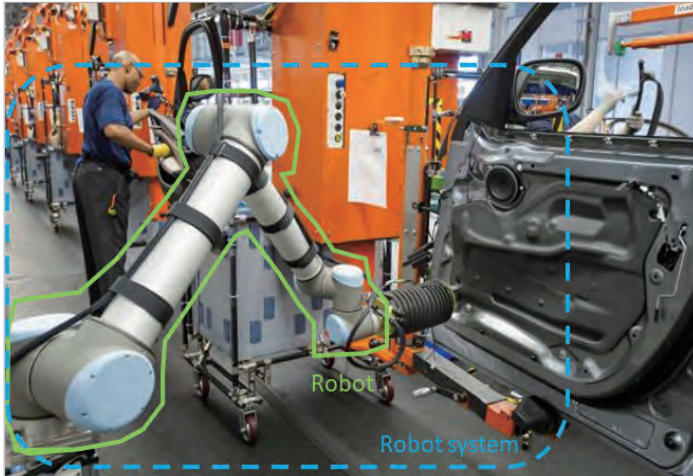


그림 11-9 로봇과 로봇 시스템 구분 (<https://www.universal-robots.com/blog/the-new-world-of-automotive-manufacturing-cobots-optimize-quality-output-and-roi-for-oems-and-suppliers/>)

앞서 언급한 산업용 로봇 관련 국제표준 세 개의 관계는 그림 11-10과 같다. 서로 공유하는 위험원과 위험한 상황이 있을 수밖에 없는 점을 고려하면 충분히 이해할 수 있는 관계도 일 것이다. 다만, 그림에 추가된 ISO 13849-1은 불필요한 혼란을 피하기 위해 다른 장에서 설명하도록 한다.

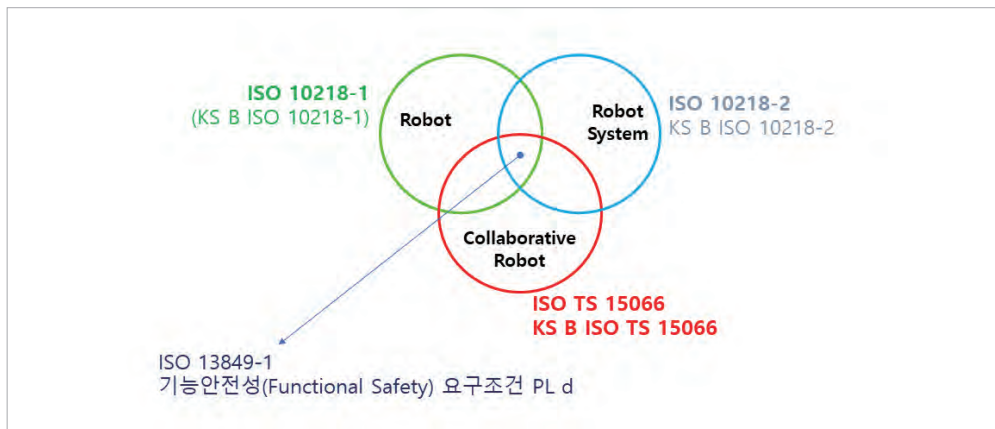


그림 11-10 산업용 로봇 안전 요구조건 관련 ISO 국제표준 관계도

여기서 ISO 10218-1, ISO 10218-2를 KS로 부합화하여 제정된 KS B ISO 10218-1, KS B ISO 10218-2 문서의 구성을 살펴보겠다. 다음 목차에서 두 문서가 서로 대칭 형태를 이루고 있음을 알 수 있고, 무엇보다도 앞에서 설명한 위험원, 위험성, 위험성 평가, 위험성 감소의 개념에 따라서 내용이 구성된 것을 확인할 수 있다.

- 1. 적용범위**
 - 2. 인용표준**
 - 3. 용어와 정의**
 - 4. 위험원 인지와 위험도 평가**
 - 5. 설계 요구사항 및 보호 수단**
 - 5.1 일반사항
 - 5.2 일반 요구사항
 - 5.3 구동 제어(actuating controls)
 - 5.4 안전관련 제어 시스템 성능(하드웨어/소프트웨어)
 - 5.5 로봇정지 기능
 - 5.6 감속 제어(speed control)
 - 5.7 운전모드(operational mode)
 - 5.8 교시상자 제어
 - 5.9 동시동작 제어(control of simultaneous motion)
 - 5.10 협동운전 요구사항(collaborative operation requirements)
 - 5.11 특이점 보호(singularity protection)
 - 5.12 축 제한(axis limiting)
 - 5.13 무동력 동작(movement without drive power)
 - 5.14 로봇 들어올리기에 대한 규정
 - 5.15 전기 커넥터
 - 6. 안전 요구사항 및 보호 대책에 대한 확인 및 검증**
 - 6.1 일반사항
 - 6.2 확인 및 검증 방법
 - 6.3 필수 확인 및 검증
 - 7. 사용 정보**
 - 7.1 일반사항
 - 7.2 지침 안내서
 - 7.3 표시
- 부속서 A(참고) 주요 위험원 목록**
- 부속서 B(규정) 정지 시간 및 거리 측정**

부속서 C(참고) 3-위치 동작하가 장치의 기능적 특성
 부속서 D(참고) 선택 사양
 부속서 E(참고) 표시 방법
 부속서 F(규정) 안전 요구사항 및 대책의 확인 수단
 참고문헌

그림 11-11 KS B ISO 10218-1의 목차

1. 적용범위
2. 인용표준
3. 용어와 정의
4. 위험원 식별과 위험도 평가
 - 4.1 일반사항
 - 4.2 배치(layout) 설계
 - 4.3 위험도 평가(risk assessment)
 - 4.4 위험원 식별(hazard identification)
 - 4.5 위험원 제거 및 위험도 감소(hazard elimination and risk reduction)
5. 안전 요구사항 및 보호 대책
 - 5.1 일반사항
 - 5.2 안전 관련 제어 시스템 성능(하드웨어/소프트웨어) (safety-related control system performance)
 - 5.3 설계 및 설치(design and installation)
 - 5.4 로봇 동작 제한(limiting robot motion)
 - 5.5 배치(layout)
 - 5.6 로봇 시스템 운전 모드 응용(robot system operational mode application)
 - 5.7 교시 상자(pendants)
 - 5.8 유지보수 및 수리(maintenance and repair)
 - 5.9 통합 제조 시스템(Integrated Manufacturing System, IMS) 인터페이스
 - 5.10 안전 보호 장치(safeguarding)
 - 5.11 협동 로봇 운전(collaborative robots operation)
 - 5.12 로봇 시스템의 시운전(commissioning of robot systems)
6. 안전 요구사항 및 보호 대책에 대한 확인 및 검증
 - 6.1 일반사항
 - 6.2 확인 및 검증 방법(verification and validation methods)
 - 6.3 필수 확인 및 검증(required verification and validation)
 - 6.4 보호 장치의 확인 및 검증(verification and validation of protective measures)

7. 사용 정보

7.1 일반사항

7.2 지침 안내서(instruction handbook)

7.3 표식(marking)

부속서 A(규정) 주요한 위험원 목록

부속서 B(참고) 보호 장치와 관련된 표준 관계도

부속서 C(참고) 부품의 입 출구 지점에 대한 보호 장치

부속서 D(참고) 하나 이상의 동작 허가 장치 운전

부속서 E(참고) 협동 로봇의 개념적 응용 분야

부속서 F(참고) 프로세스 관찰

부속서 G(규정) 안전 요구사항 및 대책의 확인 수단

참고문헌

그림 11-12 KS B ISO 10218-2의 목차

산업용 로봇과 산업용 로봇 시스템에 대한 안전 요구조건 표준은 결국 ISO 12100에서 규정하고 있는 안전성, 위험성의 기본 개념을 로봇, 로봇 시스템에 적용해서 구체적인 사례와 내용을 구성한 문서라고 생각할 수 있다. 즉, ISO 12100에서 규정하고 있는 개념은 모든 기계와 기계류에 적용되는 개념이고, 이 기본 개념을 이해해야만 로봇에 대한 안전 요구조건 개념도 이해할 수 있다.

이 두 문서는 2011년에 개정되었고, 이때 이미 협동 작업, 협동 로봇에 대한 안전 요구조건이 문서에 포함되었다. 이 문서를 기준으로, 2013년에 협동 로봇 UR을 이용한 협동 로봇 시스템이 구축되어 인증을 받은 것이다. 다만, 2011년에 개정된 ISO 10218-1, 2 문서에는 협동 작업과 관련된 안전 요구조건을 충분히 반영하지 못했다는 의견이 있어서, 협동 작업 안전 요구조건 중 미진한 부분을 보완하기 위해서 별도의 문서 ISO TS 15066이 2016년에 제정되었고 그 목차는 다음과 같다.

1. 적용범위
2. 인용표준
3. 용어와 정의
4. 산업용 협동 로봇 시스템 설계(Collaborative industrial robot system design)
 - 4.1 일반사항
 - 4.2 협동 작업 설계(Collaborative application design)
 - 4.3 위험원 식별과 위험도 평가(Hazard identification and risk assessment)
5. 협동 로봇 작업 설계(Design of the collaborative robot applications)
 - 5.1 일반사항
 - 5.2 안전 관련 제어 시스템 성능(Safety-related control system performance)
 - 5.3 협동 작업 영역의 설계(Design of the collaborative workspace)
 - 5.4 협동 로봇 운전의 설계(Design of the collaborative robot operation)
 - 5.5 협동 운전(Collaborative operations)
6. 확인 및 검증
7. 사용 정보
 - 7.1 일반사항
 - 7.2 협동 로봇 운전에 대한 정보
 - 7.3 협동 로봇 시스템에 대한 설명
 - 7.4 작업 영역 적용에 대한 설명
 - 7.5 업무에 대한 설명
 - 7.6 동력 및 힘 제한에 대한 정보
- 부속서 A (규정) 준정적 접촉과 동적 접촉에 대한 제한
 - A.1 일반사항
 - A.2 신체 모델
 - A.3 생체 역학적 제한 사항
- 참고문헌

그림 11-13 KS B ISO TS 15066의 목차

이 문서 역시 ISO 12100의 기본 개념을 협동 작업에 적용한 것이다.

ISO 10218-1, 2와 ISO TS 15066은 협동 작업을 표 11-1과 같이 네 가지 종류로 구분하여, 각 작업별로 위험원, 위험 상황, 위험 사건들을 고려하고, 각 경우에 선택할 수 있는 방호장치와 추가 안전조치를 제시하고 있다.

표 11-1 협동 작업의 종류 및 위험성 감소 방법

협동 작업 종류	위험성 감소 방법	필요한 센서 또는 방호장치
안전정격 감시 정지 (Safety-rated monitored stop)	사람이 협동 작업 영역에 존재할 경우 로봇은 움직이지 않는다.	사람이 협동 작업 영역에 진입했는지, 잔류하는지를 감지할 수 있는 센서
핸드가이딩 (Hand guiding)	로봇은 사람이 접촉을 통해 직접적으로 부가하는 입력에 따라서만 움직인다.	사람이 협동 로봇의 말단부를 잡고 있는지 아닌지를 검출할 수 있는 스위치
속도 및 이격 거리 감시 (Speed and separation monitoring)	로봇과 사람 사이의 간격이 안전거리 이상인 경우에만 로봇이 움직인다.	사람과 로봇 사이의 거리와 사람과 로봇 사이의 상대 속도를 감지할 수 있는 센서
일률 및 힘 제한 (Power and force limiting by inherent design or control)	로봇과 사람이 접촉하는 경우, 로봇은 사람에게 제한된 크기의 정적, 동적 힘만을 전달한다.	사람과 로봇 사이의 접촉력을 감지할 수 있는 센서

선행 로봇 안전관련 여러 표준에 비해 ISO TS 15066 문서가 갖는 주요한 차별성은 인간과 로봇의 충돌/접촉에서 허용되는 생체역학적 기준(힘, 압력) 값을 명시적으로 제시하고 있다는 점이다. 이 임계치는 그림 11-14에 보인 바와 같이 독일 DGUV의 후원으로 독일 Mainz 대학에서 수행한 인체 시험 데이터를 기반으로 작성되었다. 이 시험에서 신체 주요 29개 부위에 준정적 기계적 자극을 가하고 피시험자가 느끼는 통증 시작점에서의 힘과 압력을 측정하여 물리적 작용력(힘, 압력)의 허용 기준으로 정한 것이다. 이와 같은 시험은 한국의 경희대에서도 수행된 바 있으며, 경희대 공대의 시험 결과를 바탕으로 독일 Fraunhofer에서 추가 시험이 계획되어 현재 진행 중이며, 경희대와 Fraunhofer의 협업을 통해 새로운 생체역학 기준이 국제표준으로 제안될 것으로 기대된다.

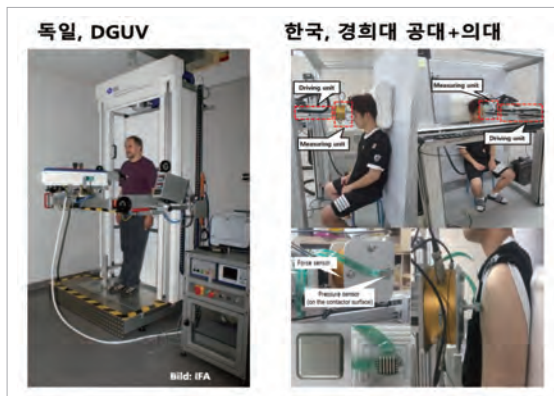


그림 11-14 통증 임계치 측정 시험 사례 (<https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/kollaborierende-roboter/schmerzschwellenkataster/index-2.jsp>)

4. 협동 로봇 안전성 평가와 안전 제어

협동 로봇의 안전성과 협동 로봇 시스템의 안전성은 별개의 문제로 취급되어야 한다는 점은 앞에서 언급한 바 있다. 협동 로봇에 어떤 형상의 도구가 부착되어 사용되느냐에 따라 협동 로봇 시스템의 위험성은 급격한 변화를 갖는다. 비록 ISO TS 15066 표준에서 접촉/충돌 시 허용되는 생체역학적 기준치(힘, 압력)를 제시하고 있으나, 실제 로봇 시스템이 이 조건을 만족하는지 여부를 평가하는 것은 매우 어려운 일이다.

우리가 직관적으로 생각할 수 있는 안전조건 충족 여부 평가 방법은 로봇에 직접 부딪혀서 발생하는 힘과 압력을 측정하고, 그 값이 ISO TS 15066에 제시된 값 이하임을 증명하는 것이다. 그러나 이러한 평가는 그림 11-15에 보인 것처럼 실제 인체를 대상으로 할 수 없으며, 인체와 같은 역학적 특성을 갖는 인체 터미를 사용해야 할 뿐만 아니라 그림 1-16에 나타난 것처럼 로봇의 이동경로 상 모든 점에서 모든 충돌 방향(특히 로봇의 형상 특성에 민감한 충돌 방향)에 대한 평가를 진행해야 한다는 점을 고려하면 그 시간과 비용면에서 현실적으로 수용할 수 없는 접근 방법이다.

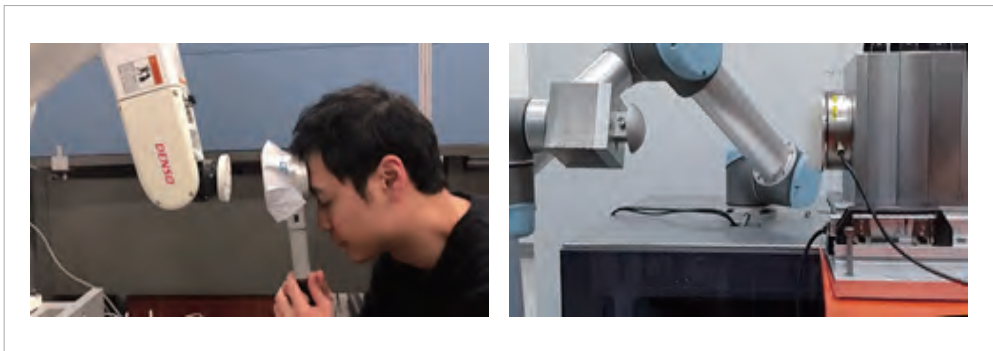


그림 11-15 협동 로봇 시스템의 접촉/충돌 안전성 측정 사례 (경희대, Safetics)

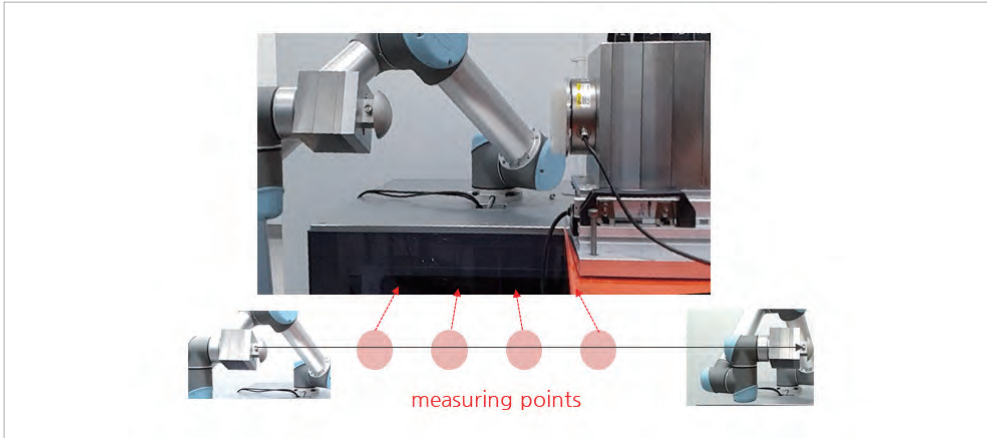


그림 11-16 협동 로봇 시스템의 이동 경로 상의 충돌 측정 시험점 설정 사례 (경희대, Safetics)

이러한 현실적 어려움을 극복하고자 최근에 제안된 기술이 인체 충돌 모델 기반 충돌위험성 평가 방법이다. 충돌 모델을 이용하면 다양한 로봇 형상과 운동 조건에 대해서 충돌안전성을 손쉽게 빠르게 평가할 수 있다. 이는 마치 건축물의 구조 안전성 평가를 위해 건축물을 직접 시험하는 대신, 수치해석 프로그램을 이용해서 수행한 구조해석 보고서를 평가하는 것과 마찬가지로 개념이다.

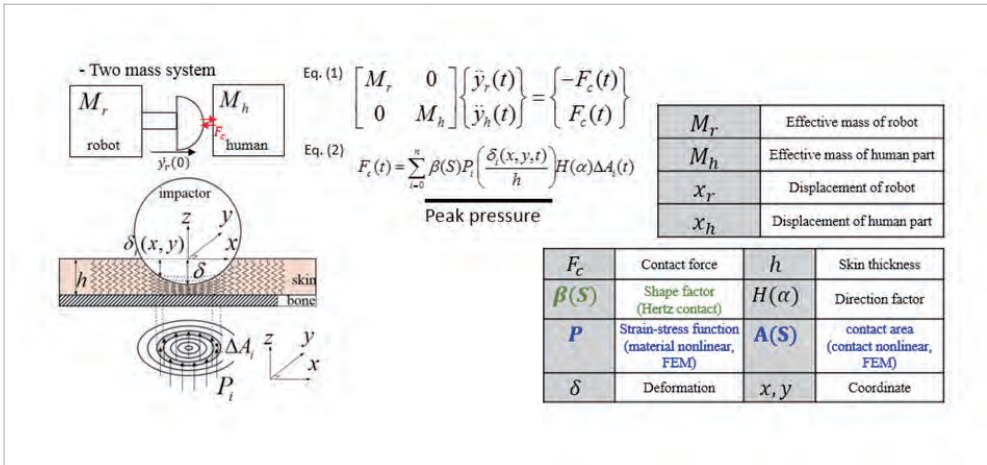


그림 11-17 협동 로봇 시스템의 충돌 모델(인체 모델 포함) 사례 (경희대, Safetics)

이러한 충돌 모델을 이용한 충돌위험성 평가 방법은 그 정확성 면에서 이미 일정 수준 이

상의 신뢰성을 확보해가고 있으며(그림 11-18 참조), 현실적으로 유의미한 유일한 접근 방법이라는 점에서 지속적으로 발전이 기대되는 분야이다.

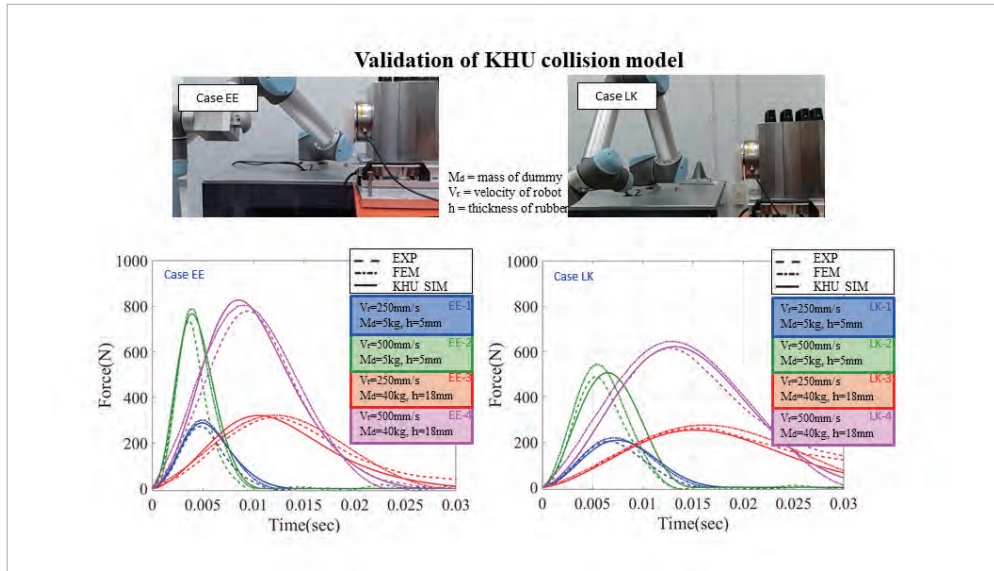


그림 11-18 협동 로봇 시스템의 충돌 시험 결과와 충돌 모델을 이용한 추정치의 비교 (경희대)

이 방법을 이용하면 협동 로봇의 충돌안전성은 실시간으로도 평가될 수 있으며, 이 경우 협동 로봇의 현재 속도와 자세가 허용되는 위험성을 갖는지 여부를 판단하여 안전하면서도 가장 빠른 속도와 자세를 계산할 수도 있다. 이 안전속도와 안전자세를 활용하면 추가 센서의 사용 없이도 로봇 스스로 안전한지 판단할 수 있으며, 이는 사람이 스스로의 동작이 얼마나 위험한지를 인지하는 것과 같은 지능으로 발전할 수 있다. 이러한 지능을 안전지능(Safety Intelligence)이라고 부를 수 있다.

안전지능과 관련해서 최근 의미 있는 연구 결과와 제품이 소개되고 있다.

5. 마치며

협동 로봇을 이용한 협동 로봇 시스템은 그 응용 범위를 넓혀가며 생산 제조 산업 분야뿐만 아니라 일반인을 대상으로 하는 서비스 로봇 분야에서도 빠르게 사례가 증가하고 있다.

그러나 협동 로봇을 보다 안전하고 효율적으로 사용하기 위해서는 안전성 평가와 안전 제어 면에서 아직도 개발되어야 할 기술이 많다. 협동 로봇 분야의 시작점에 서 있는 지금 다양한 안전관련 기술의 발전이 기대된다.

이동 로봇



1. 개요

이동 로봇은 로봇의 베이스 좌표계가 이동하는 로봇을 의미하며, 따라서 보행 로봇과 드론도 이동 로봇의 범주에 포함된다. 하지만 이동 로봇은 대체로 바퀴의 회전을 이용하는 이동성을 가진 바퀴 기반 로봇(Wheel-based Robot)으로 대표된다.

이동 로봇의 가장 큰 문제점을 무엇일까? 이동 로봇의 성향과 관련 기술의 연관성을 의미하는 가장 큰 차이점에 대한 질문이라 할 수 있다. 이동 로봇은 접촉과 관련된 문제에 의해 모든 방향성이 결정된다고 할 수 있다. 로봇은 정말로 다양한 분야가 모두 포함된다. 이 중 가장 어렵다고 생각되는 문제점 중 하나는 물체와 물체가 만나고 부딪히는 접촉 현상이라고 할 수 있다.

접촉(Contact)이 갖는 문제점은 로봇 분야의 흐름과도 일맥상통한다. 초기의 모델링 기반 방법론의 놀라운 성과는 센서 기술 발달과 제어 이론의 발전으로 연결되어, 이미 80년대에 정밀 제어 로봇에 의한 산업용 로봇 시대를 개척하였다. 이러한 산업적 성과에도 불구하고, 미묘한 문제를 갖는 파지, 조립, 충돌 분야에서는 이론 개발 및 산업화가 더디게 진행되었으며 사실상 시뮬레이션조차도 매우 어려운 상황이었다. 이와 함께, 80~90년대까지의 이동 로봇 분야의 발전은 상대적으로 더디게 진행되었고, 하드웨어와 메커니즘 개발이 주류를 이루었다.

접촉은 물체와 물체가 접하는 것을 의미하며, 접촉점 또는 면이 많은 문제를 다중 접촉

(Multi Contact)이라 한다. 접촉은 어떠한 문제점을 가질까?

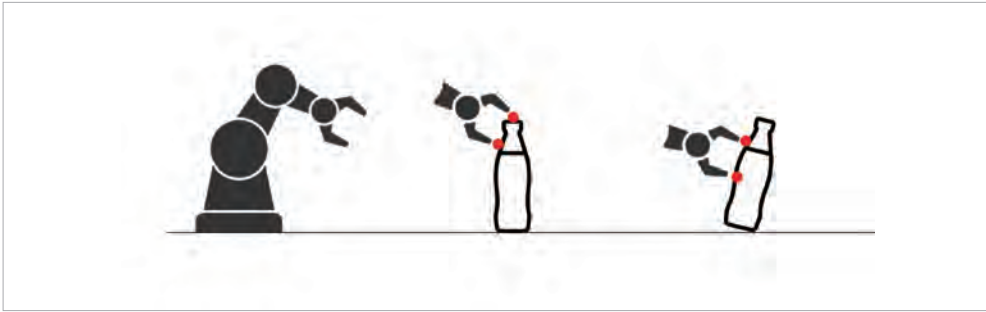


그림 12-1 접촉에 대한 모델링의 어려움

그림 12-1을 보면, 그리퍼의 두 손가락이 음료수 병을 집기 위해 접촉을 이루고 있다. 이러한 접촉 상황에서 로봇 자체의 속도와 함께, 음료수 병의 형상과 접촉 위치에 따라 로봇에 측정되는 힘은 다르게 된다. 또한, 첫 번째 접촉과 달리 두 번째 접촉에서는 음료수 병과 바닥과의 접촉이 변경되어 있다. 음료수 병을 집기 위한 모델링은 힘과 위치에 대한 고려가 기본적으로 필요하지만 음료수 병과 바닥과의 관계까지 고려하면, 다중 접촉에 대한 모델과 마찰계수, 마찰 특성에 대한 고려가 불가피해진다. 과연 우리는 이러한 정보를 모두 모델링할 수 있을까? 모델링을 하더라도 각종 파라미터는 어떻게 측정할 수 있을까? 접촉이 있는 문제는 이처럼 모델링의 범주를 벗어나는 경우가 대부분이다.

로봇 팔이 움직이는 경우, 관절 간의 접촉이 발생한다. 관절은 인코더를 이용한 제어가 진행되기 때문에 오차 범주 안에서 각 관절의 각도가 정교하게 제어되므로 로봇 끝단의 오류가 적다. 하지만 로봇 팔이 물체를 집어 올리거나, 물체를 움직여 조립하는 경우는 역시 접촉이 발생하며 접촉에 의한 문제를 고려해야 한다.

이제 원래의 주제인 이동 로봇을 고려해보자, 이동 로봇은 접촉점 또는 면이 매우 많다. 드론처럼 안정성이 낮은 이동 로봇의 경우에는 공기와의 접촉이 큰 영향을 주지만, 바퀴형 이동 로봇은 최소한 2점, 전후방의 캐스터를 고려하면 최소 3개, 일반적으로 6개의 접촉을 갖는다. 또한, 바퀴와 노면과의 접촉 면은 로봇 움직임에 따른 하중 이동에 따라, 마찰계수의 지속적 변화가 발생하며 노면 위를 움직이므로 노면 정보가 계속 변경된다.

그렇다면, 접촉은 어떻게 해결해야 할까? 접촉에 의한 로봇 팔과 같은 제어만으로는, 이동

로봇은 바퀴가 밀리거나, 정확한 지점으로 이동하기 어렵다. 그렇지만, 이러한 행동은 특정한 범주 안에서는 원하는 동작을 수행한다고 할 수 있다. 바로 확률적으로 결정된다고 할 수 있다. 이는 제어에서의 특정한 영역 내의 동작을 보장하는 마진(Margin)의 의미와는 다르다. 마진은 부등호를 이용한 영역(Inequality Constraint) 내의 동작을 의미하지만, 확률은 이러한 부등호가 사용되지 않는다. 예를 들어 마진은 100보다 작으면 동작한다고 할 수 있지만, 확률에서는 매우 낮은 비율로 평균치보다 매우 크거나 작은 경우가 발생할 수 있다.

이동 로봇은 확률론이 지배하는 세상에서 로봇을 다루는 학문이다. 확률적 또는 추계적(Stochastic) 문제에 해당하므로, 기존의 결정론적(Deterministic)인 모델링 기반 방법론의 접근 방식과는 차이가 있다. 예를 들어, 이동 로봇은 미끄러짐이 없이 이동할 수 있는가? 없다. 두 개의 바퀴로 이동하는 로봇은 제어를 통해 바퀴를 정교히 움직이면 똑바로 직진할 수 있는가? 불가능하다. 두 바퀴 간의 미끄러짐에 의해 왼쪽 또는 오른쪽으로 방향이 비틀어진다.

이처럼 확률적 세계관에서는 기존의 방법론과 다른 접근 방식이 필요하다. 문제를 해결하기 위한 방법론도 확률적으로 설계해야 하며, 센서의 활용도 확률적으로 고려하고 위치, 속도와 같은 상태량도 확률 문제로 고려해야 한다. 이러한 성향은, 인공지능 분야가 초기에 규칙과 로직으로 구성되었다가, 실환경 적용에의 문제점에 의해 데이터 기반, 점진적 학습법(Incremental Learning) 등의 방법론과 확률적 접근으로 발전하였던 과정과 유사하다. 이제부터 결정론적인 접근을 대체하는 확률적 방법론에 대해 다루어 보자.

2. 확률 기반 접근

이번 절에서는 로봇 시스템의 확률 기반 접근의 몇 가지 사례를 다루고자 한다. 로봇 청소기를 통한 확률 기반의 문제 해결 방식과 함께, 이동 로봇에서의 확률적 상태값을 구성하는 측정과 관측의 차이 및 의미의 중요성에 대해 다룬다.

2.1 확률 기반의 주행 기법

로봇 청소기는 2000년대 초 처음 등장한 후, 자율 주행을 대표하는 기술 용어인

SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기술과 동일한 발전 방향으로 성장하였다. 초기에는 간단한 센서만을 이용하였으나 점차로 천장을 보는 카메라를 사용하는 vSLAM의 적용과 최근에는 저가 레이저 스캐너를 활용한 방식이 주를 이루고 있다.

많은 경우, 로봇 청소기의 세대 변화가 거듭될수록 좀 더 나은 성능을 기대하게 되지만, 특이하게도 로봇 청소기 분야에서는 약간 미묘한 점이 있다. 최근의 청소기는 SLAM 기술의 적용으로 정확한 위치 파악에 장점이 있는 것이 사실이다. 하지만 로봇 청소기의 주목적은 청소를 잘하는 것이지, 높은 위치 정확도를 갖는 것이 아니다. 청소기로 청소를 하는 경우, 한 번 지나간다고 청소가 완벽하게 되지 않기 때문에 여러 번 청소할 수도 있고, 벽이나 테이블 다리와 충돌이 있더라도 구석구석 청소를 잘하는 것이 중요하다. 이러한 이유로, 로봇 청소기의 청소 성능과 SLAM의 성능은 서로 동일하지 않다.

이러한 특수성을 고려하여, 저가의 센서와 연산 장치로 구성되었던 초기의 로봇 청소기, 룸바가 택한 전략의 우수성을 살펴보고자 한다. 많은 이동 로봇 분야에서는, SLAM의 기술성에 집중하지만 실제로 지능형 로봇으로서의 핵심 지표는 내비게이션, 주행 성능에 달려 있다. SLAM은 불확실한 환경에서 확률에 기반을 둔 위치 정보를 제공하는 기능으로, 지능적인 주행 성능과는 거리가 있다. 특히 자동차 자율 주행에서는 SLAM의 역할보다는 어떠한 판단을 통해 주행하는가가 훨씬 중요하다.

초기의 로봇 청소기인 룸바는 일반적으로 나선형 움직임을 랜덤하게 갖는 정도로만 알려져 있다. SLAM 적용이 되는 최근 청소기는 맵 작성을 통해 방의 크기를 알 수 있으나, 룸바는 3개의 저가형 거리 센서와 전방 충돌을 On/Off로 감지하는 센서만으로 구성된다. 이러한 저성능의 하드웨어로는 방의 크기 및 위치를 알기 어렵기 때문에, 룸바는 나선형 움직임을 통해 적당히 방을 청소하고 벽을 따라 이동하는 기술(Wall following)로 구성된 것으로 많이 알려져 있다. 많은 국내 기업들의 경우도 나선 궤적과 랜덤 요소를 이용하여 룸바와 비슷한 방식을 구현하여 사업화하였으나, 성능 면에서 큰 격차를 보였다. 청소기가 벽에 부딪힐 때마다 방향을 랜덤하게 변경하면, 벽 주변과 방 중앙을 지나는 사전(Prior) 확률에 차이가 있어 방 전체를 청소하는 성능에 차이가 생긴다.

과연 룸바는 랜덤 움직임만으로 적당히 청소를 하려 했을까? 실제 환경에서의 청소 기능 구현을 위해서 방을 돌아다니는 랜덤 모션을 사용해보면, 결과가 매우 좋지 않다. 먼저, 벽에

부딪히는 경우 흔히 미로를 탈출하는 기법인 좌수법 또는 우수법을 사용하여 왼쪽이나 오른쪽으로 회전하여 벽을 회피하는 경우를 생각할 수 있다. 그림 12-2의 오른쪽 그림에서 좌수법에 의해 움직이는 경우, 지속적으로 오류가 증가하는 것을 볼 수 있다.

이러한 경우 앞서 언급한 것처럼, 벽에 부딪히거나 벽 주변을 따라 움직이는 것은 접촉 문제가 발생한다. 따라서, 벽에 접촉하면 벽과 로봇 간 끼임 현상으로 로봇이 원하는 각도로 움직이는 것이 어렵다. 접촉을 회피하기 위해(다른 말로 벽 주변에서 원하는 각도로 회전하는 성공률을 높이기 위해) 거리 센서를 이용해서 벽에서 멀리 멈추고 회전을 하면 벽 주변의 청소가 불가능하다. 실제로 이러한 전략을 사용했던 기업의 청소기는 SLAM과 고정밀 거리 센서를 활용하였으나 시장에서 실패했다.

로봇 청소기에서 또 다른 문제점은 저가 센서만으로는 똑바로 갈 수가 없다는 것이다. 글로벌 좌표계에서 방향을 알려줄 수 있는 것은 자자기 센서, 즉 컴퍼스인데 책상 등 주위 철을 사용한 제품에 영향을 받는다. 자이로 센서의 경우는 로컬 영역, 즉 현재 위치에서 몇 번의 이동에 따른 각도를 추정할 수 있으나, 많은 거리를 이동하는 경우는 각도 변화를 측정할 뿐 각도를 추정할 수 없다.

이처럼 로봇 청소기가 똑바로 갈 수 없는 것은 바퀴의 접촉에 의한 문제와 함께 글로벌 좌표계에서 각도 측정 센서가 없거나 정확도가 떨어지기 때문이다. 그림 12-2는 바퀴의 각속도를 토대로 수치 적분하여 이동 거리를 계산하고, Jacobian 행렬을 토대로 움직임을 시뮬레이션한 결과이다. 각 바퀴의 이동 거리는 미끄러짐(Slip)에 의한 노이즈 성분이 추가되어 똑바로 진행하기 어려운 실제 상황이 반영되어 있다.

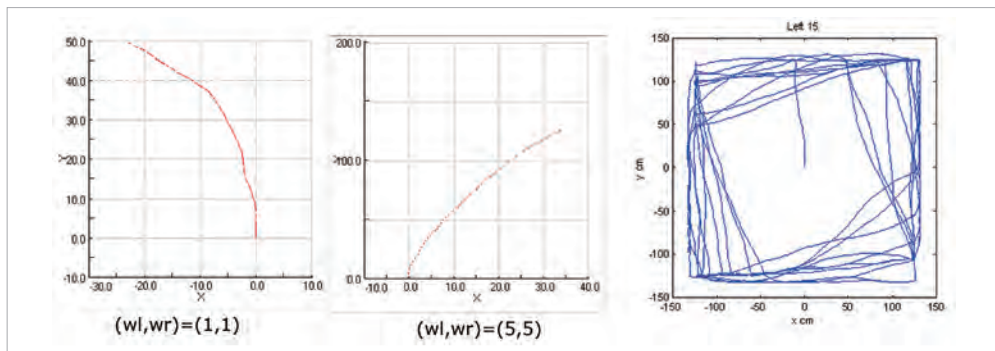


그림 12-2 표준편차 0.2의 슬립 환경에서 직진 주행의 어려움 및 좌수법 기반 주행의 한계

그렇다면, 해결 방안은 무엇일까? 로봇이 똑바로 갈 수 없다면 왼쪽 또는 오른쪽으로 휘어지기 때문에, 한쪽 방향으로 계속 회전을 하는 것은 어떨까? 실제 실험에 의하면 로봇의 한쪽 바퀴의 속도가 다른 쪽보다 큰 경우, 예를 들어 왼쪽 바퀴가 오른쪽 바퀴보다 많이 돌게 되면 항상 우회전이 가능하다.

다음 그림 12-3처럼 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 출력을 생성하는 경우, 고정된 값이 아니라 정규 분포를 통해 확률적으로 출력을 결정한다고 가정해 보자. 정규 분포에 따라 평균값과 표준편차가 정의되면, 바퀴의 출력은 순서와 상관없이 정규 분포 형태로 출력된다. 이때, 양 바퀴의 평균값을 왼쪽 값이 오른쪽 값보다 크게 구성하면, 확률적으로 로봇은 시계방향으로 회전할 가능성이 크게 된다. 따라서, 똑바로 직진하는 것은 어렵지만 로봇이 우회전하여 오른쪽 방향으로 회전하게 만드는 것은 가능하다. 주의할 점은 양쪽 바퀴가 정규 분포에 따라 출력이 결정되기 때문에 확률적으로 좌회전할 가능성은 매우 작다는 점이다.

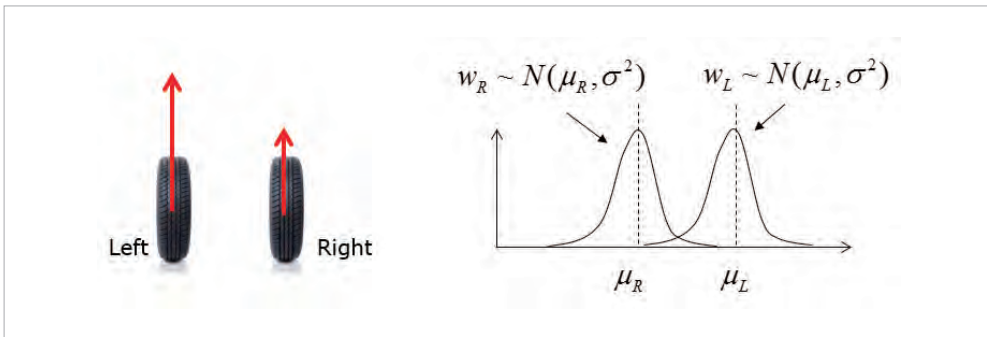


그림 12-3 좌, 우 바퀴의 회전 속도를 정규 분포로 결정하는 경우

주행 속도를 정규 분포로 결정함에 따라 몇 가지 상황이 예측 가능하다. 출력이 일정하지 않으므로 로봇의 이동 속도 및 회전 속도가 일정하지 않게 된다. 만약 무언가에 충돌 후 몸체가 끼어 있는 상황에서는 결정론적 방법론으로 앞뒤로 이동하는 것보다 출력의 다양성이 있기 때문에 탈출 가능성이 커지게 된다. 또한, 앞의 그림의 경우, 확률적으로 우회전을 하지만 회전 반경이 일정하지 않은 움직임을 보이게 된다.

앞서 언급한 끼임 현상을 회피하는 전략에 대해 생각해보자. 근거리 측정 센서만을 가진 로봇 청소기의 경우, 태스크 공간을 이해하기 위해 벽은 유일한 정보이다. 벽을 잘 따라 돌

수 있다면, 방의 크기에 대해 예상이 가능하고 닫힌 공간의 청소가 어느 정도 진행되면 청소를 자동 종료할 수 있는 중요한 정보이다. 앞선 좌수법을 사용하기 위해서는 벽과의 1차 충돌 시에 벽을 따라 자연스럽게 좌측으로 회전하는 것이 중요하다. 이러한 기능을 구현하기 위해 결정론적 방법론으로 구성한다면 로직은 다음과 같다.

1. 직진한다.
2. 장애물이 전방에 감지된다.
3. 왼쪽으로 90도 회전한다.
4. 장애물이 감지되지 않으면 1번 태스크를 수행한다.

이러한 방식은 로봇이 벽면에서 어느 정도 거리가 떨어져 있는 경우에만 성립한다. 이를 림바가 사용하는 확률적 방법론으로 재구성해보면 다음 그림과 같다.

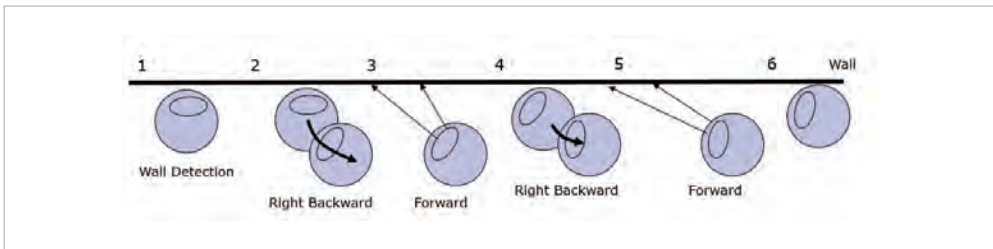


그림 12-4 벽 주변에서 전, 후진을 통해 방향을 90도 왼쪽으로 회전하는 전략

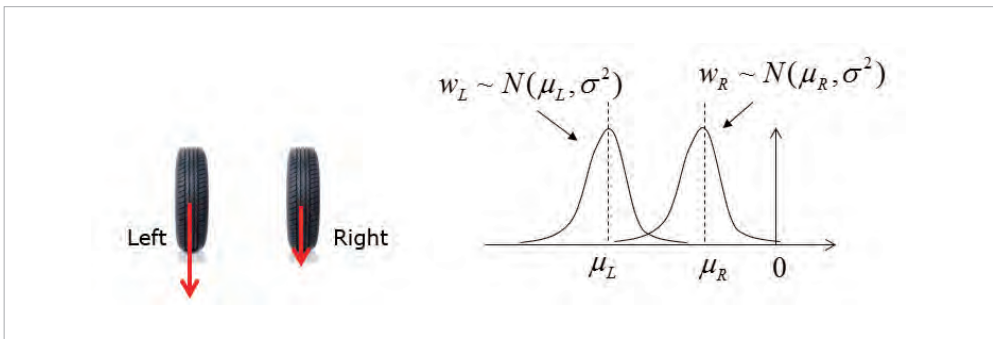


그림 12-5 벽 주변에서 전, 후진을 통해 방향을 90도 왼쪽으로 회전하는 전략

먼저 1번처럼 벽에 충돌하게 되면, 전방 범퍼 또는 전방 및 측면 거리 센서를 통해 벽까지

충돌이 검출된다. 2번은 충돌 시에 왼쪽으로 회전하지 않고 오른쪽 뒤로 이동하여 벽까지 거리를 어느 정도 떼어놓게 된다. 이러한 전략은 결정론적 방식에서도 유사하게 적용할 수 있다. 하지만 확률적 방법론으로 뒤로 이동하게 되어 값이 정규 분포를 이루게 하는 것이 특징이다. 정해진 값만큼 후진하게 되면 다양한 경우에 대처하기 어렵기 때문이다. 뒤로 후진하는 것 또한 특정 각도를 목표로 하지 않고 전방 및 측면 거리 센서에 장애물이 가까이 검출되지 않는 정도로 회전하면서 후진한다. 회전을 좌로 90도만큼 하지 않기 때문에 3번에서 직진을 하면 다시 벽에 부딪힌다. 이후 4번부터 2번의 전략을 반복 수행한다. 이러한 전략을 반복하면 6번 이후부터는 벽 주변에서 좌측으로 90도 가까이 회전이 되어가는 것을 볼 수 있다.

왜 이런 전략을 선택한 것일까? 해당 전략은 전방 범퍼, 전방 및 측면 센서가 정확하지 않음과 동시에 접촉이라는 문제가 가지는 특성을 해결하는 훌륭한 방법이다. 정교한 센서를 활용하더라도 로봇이 벽과 충돌이 난 경우에 벽을 피해 90도 회전하는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히, 충돌이 발생한 벽이 평면이 아닌 모서리 또는 튀어나온 부분이거나, 바닥에 놓인 가방처럼 부정형 물체인 경우에는 림바가 택한 확률형 움직임이 우수한 회피 방법이라 할 수 있다. 앞서 언급한 것처럼 벽 주변에서 충돌을 감수하더라도 청소를 해야 하는 로봇 청소기는 접촉을 피할 수 없으며, 확률적 요소와 결합되는 접촉 면을 고려할 경우, 여러 번 반복적으로 방향을 수정해나가는 방식은 확률적 환경에 적합한 방식이라 할 수 있다. 이때 2번과 4번에서의 접촉 면을 피해 나가기 위한 바퀴 구동은 그림 12-3과 유사하게 확률적으로 평균을 달리하여 수행할 수 있다. 이는 그림 12-5와 같다.

림바의 경우, 기본적으로 좌수법을 사용하여 벽면에서의 회전을 수행하고, 이후 오른쪽 벽과의 거리를 유지하며 주행하는 전략을 사용한다. 벽과의 거리가 너무 가까우면 충돌에 의해 방향을 왼쪽으로 돌리는 전략을 수행하게 되고, 벽과의 거리가 너무 멀면 우회전하여 벽 주변을 쫓아가도록 한다. 리버스 엔지니어링을 통한 테스트에서는 이중 문턱값(Double threshold)을 사용하여 이를 수행하였다.

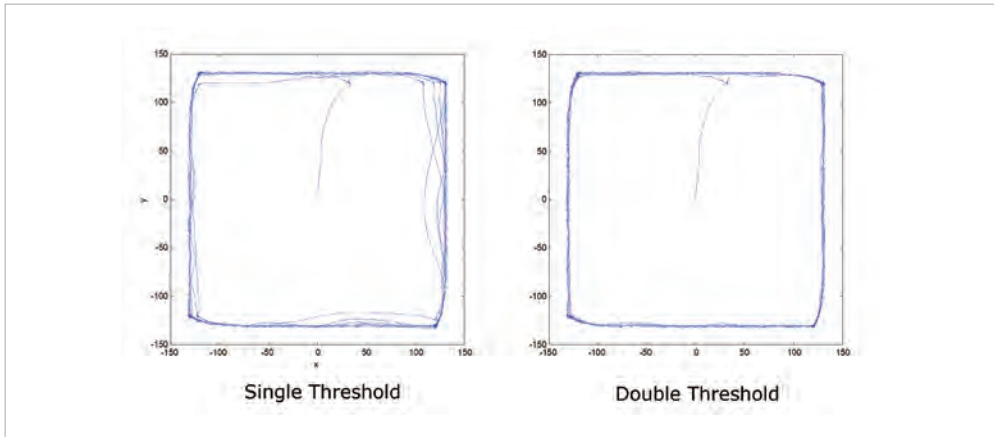


그림 12-6 벽을 따라 주행하는 Wall Following 예시

왼쪽 그림의 경우, 벽에서 청소기가 이탈하여 오른쪽으로 나선 궤적을 그리는 장면이 몇 군데 보인다. 벽에서 너무 멀리 떨어지지 않도록 방향을 조절한 경우, 오른쪽 그림처럼 벽을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 0.2 정도의 표준편차가 적용된 공간임을 고려하면, 확률 기반 전략을 수행함에 따라 벽면 추종의 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

이처럼 벽 추종 성능이 향상됨에 따라, 로봇의 주행 패턴을 통해 방의 크기를 비교적 정확하게 예상할 수 있게 된다. 앞의 데이터에서는 공간이 4개의 코너를 가지고 있고, 가로, 세로 길이 또한 서너 차례의 주행을 통해 추출해낼 수 있다. 저가의 범퍼 스위치, 광학 센서를 통해 방의 크기를 알아낼 수 있다는 것은 사실 매우 놀라운 일이다. 우수한 주행 전략을 선택함에 따라 주행 성능을 올리고 주행 결과와 저가 센서를 통해 공간을 추정하는 것은 현재의 SLAM 기술군과 비교할 만큼 우수한 방법론이다. 벽면 추종을 완료하고, 공간의 크기를 가늠하면 룸바는 초기에 나선형 궤적을 그린 위치를 어느 정도 예상할 수 있고, 공간이 작으면 청소를 멈추고, 공간이 크면 나선형 궤적의 반대 지점으로 이동한 뒤, 벽을 탈출하여 다시 나선형 궤적을 그리는 방식을 사용한다.

이러한 분석을 통해 룸바가 택한 확률적 전략을 크게 정리해보면, 단순한 두 가지 전략으로 추측된다.

1. 룸바가 동작을 시작하면 항상 오른쪽 방향으로 나선형 움직임을 시작한다.
2. 충돌이 발생하면 왼쪽으로 회전하여 벽을 따라가려고 한다.

이처럼 단순한 전략을 택하였을 때, 재미있는 점은 1번이다. 실제 실험에서도 보이는 특징 중 하나인데, 벽면을 추종하다가 돌출된 장애물을 지나가는 순간, 롬바는 2번 전략이 실패하게 된다. 2번 전략은 단순히 벽뿐만 아니라 오목한 지형에서도 아주 잘 동작한다. 하지만 불룩한 공간에서 2번 전략은 벽면을 잃어버리면서 1번 전략으로 변환된다. 이러한 성향에 의해 롬바는 돌출 부위에서 벽 추종 성능이 다소 떨어진다. 나선형 궤적은 처음에는 반지름이 작고, 점차 반지름이 커지는 회전에 해당하므로 벽을 찾는 데 유리하나, 일부 영역을 지나가지 않는 특유의 패턴이 발생하게 된다.

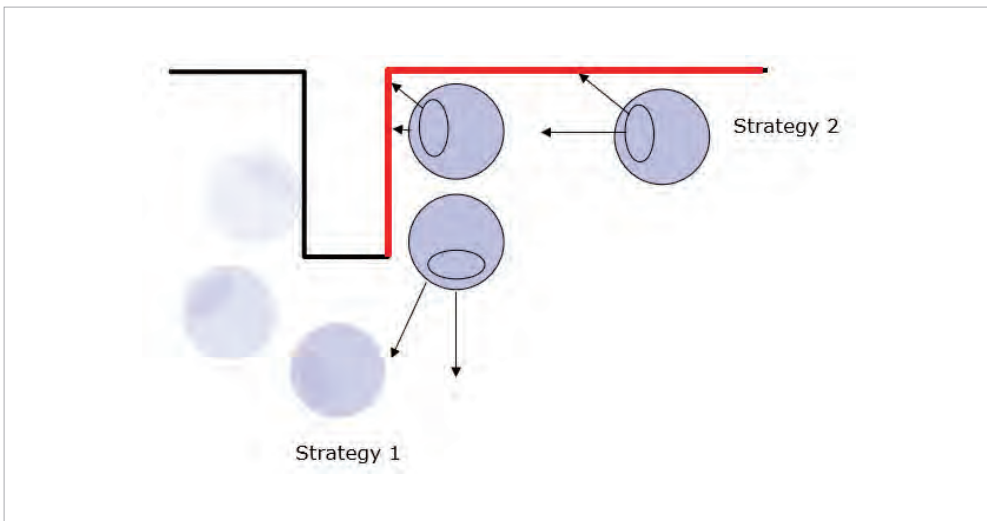


그림 12-7 롬바의 지형에 따른 전략 변경

이러한 롬바의 확률적 주행 기능은 이동 로봇에게 주어진 확률적 세계의 문제점과 해결을 위한 전략, 이론적 방법이 모두 확률 형태로 전환되어야 하는 좋은 사례라 생각된다. 많은 학부과정의 교과학습이 모델링 기반 방법에 집중되어 있어, 확률 형태의 문제로 생각의 전환이 필요하다. 로봇 청소기 사례는 기존의 전통적인 결정론적 세계관을 대신하여 확률적, 추계적(stochastic) 세계관에서의 문제 해결 방식을 간단하게 표현하는 좋은 예시에 해당한다. 또한, 이동 로봇에 SLAM 기술이 필요하지만 SLAM보다 중요한 것은 결국 자율 주행, 즉 주행 성능을 어떻게 지능적으로 구현하는가에 달려 있다. 이러한 확률 기반 문제 및 주행에 대한 다양한 사례를 이어서 살펴보고자 한다.

2.2 측정(Measurement)과 관측(Observation)

유명한 이동 로봇 중 하나는 세그웨이라고 할 수 있다. 두 개의 바퀴와 손잡이만으로 구성되어 탑승자의 무게 중심 이동을 통해 앞, 뒤 이동 및 좌, 우 방향 전환을 수행하는 세그웨이는 쉽게 타는 요령을 배울 수 있고, 간단해 보이는 구조로 구현해보고자 하는 시도도 많은 분야이다.

공학적인 관점에서 세그웨이는 역진자 모델로 언급된다. 복잡한 제어 이론을 차치하고, 간단히 앞으로 기울어지면 앞으로 이동하여 중심을 잡고, 뒤로 기울어지면 뒤로 이동하여 중심을 잡는 제어로 구성할 수 있다. 세그웨이에 자이로 계열 센서를 사용하면 기울어진 정도, 즉 위치 정보를 필요한 토크 정보로 변환할 수도 있다. 다음 그림의 왼쪽에서는 기울어진 정도를 토대로 이동하여 중심을 잡는 예시가 표현되어 있다.

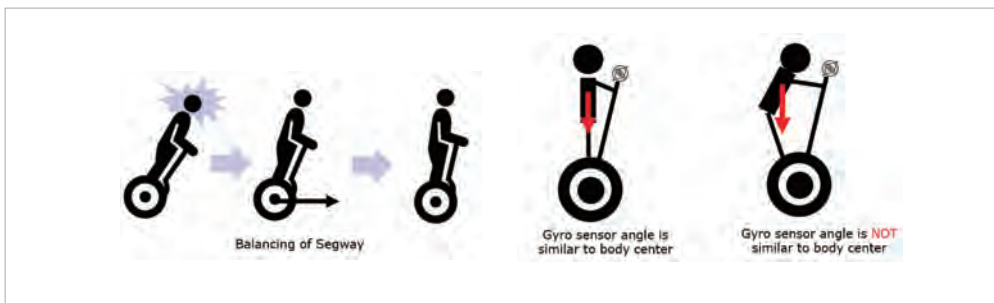


그림 12-8 세그웨이의 중심 잡기

하지만 그림 12-8의 오른쪽 예시를 보면 단순한 문제가 아님을 알 수 있다. 세그웨이에 부착된 자이로 센서는 세그웨이가 기울어진 정보를 알려 주는 것이지 탑승자의 무게 중심을 직접 알려 주지는 못한다. 탑승자가 뒤로 무게 중심을 일부러 빼면 무게 중심이 이동되고 자이로 센서와 다르게 반응할 것이다.

이러한 예시를 통해, 우리는 센서의 이용에 대해 다시 한번 생각해볼 필요가 있다. 바로 우리가 센서를 사용하여 측정하는 것은 과연 무엇일까? 라는 문제이다.

큰 사이즈의 로봇 팔을 개발하는 경우를 예로 들어보자. 5m 정도의 로봇 팔을 설계하면, 각 관절은 인코더를 통해 정확히 제어되지만, 로봇 팔은 긴 링크에 의해 휘청거리게 된다. 페루프 제어는 완벽하지만 개루프 제어인 로봇 자체의 움직임은 인코더를 통해 직접 측정이

불가능하므로 제어가 되질 않는다. 이러한 예제처럼, 인코더는 관절의 각도를 측정하는 것이지, 팔의 각도를 측정하는 것이 아니다. 세그웨이의 자이로는 세그웨이의 수직 여부를 측정할 뿐 무게 중심을 직접 측정하지 못한다.

세그웨이에서 무게 중심을 측정하기 위해서는 세그웨이의 위치와 사람의 무게 중심 간의 모델이 필요하다. 이러한 모델이 포함된 측정 방식을 보통 관측기(Observer)라 부른다.

세그웨이에서는 측정된 자이로 센서와 세그웨이의 물리적 상태값을 종합하여 관측기를 통해 우리가 원하는 무게 중심에 관한 상태값을 추정할 수 있다. 세그웨이의 물리적 요소와 자이로의 각도 간의 관계에 대한 모델은 정상적인 경우와 무게 중심이 뒤로 빠진 경우를 고려하여 설계하면 무게 중심의 상태값에 대한 관측의 정확성이 향상된다.

많은 경우, 관측기는 대학원 과정에서 다루기 때문에 측정이 아닌 관측의 중요성을 간과하기 쉽다. 관측기는 모델과 현재 측정된 값을 토대로, 원하는 상태량이 수렴되는 방식으로 제어기처럼 작성된다. 따라서, 측정된 값과 관측기 간의 관계 여부를 따져 관측이 가능한지를 판단하는 관측 가능성(Observability)을 고려하여 설계한다.

이러한 관측은 측정에 따른 노이즈를 고려해야 하며, 또한 사용된 모델의 타당성, 모델의 파라미터에 영향을 받는다. 같은 실 환경에서 동작하는 로봇이라 하더라도, 측정이 용이한 문제의 경우는 관측기 구성의 중요도가 낮으나, 이동 로봇이나 개루프 제어가 필요한 로봇의 경우 관측기는 필수적이라고 할 수 있다.

가장 유명한 관측기는 역시 칼만(Kalman) 필터라 할 수 있다. 칼만 필터 역시 관측기이므로 측정한 값을 토대로 알고 싶은 상태값을 수렴시켜 나가는 특징을 갖는다. 이와 함께, 칼만 필터가 가진 특징은 알고 싶은 상태값을 단일한 값이 아닌 확률 기반의 분포로 취급하는 것이다. 즉, 상태값을 평균과 분산으로 이루어진 분포 모델로 표현하는 특징을 갖는다. 또한 측정값과 모델 기반 상태값 간의 오차에 대한 기댓값을 반복적으로 줄이는 방식을 사용한다.

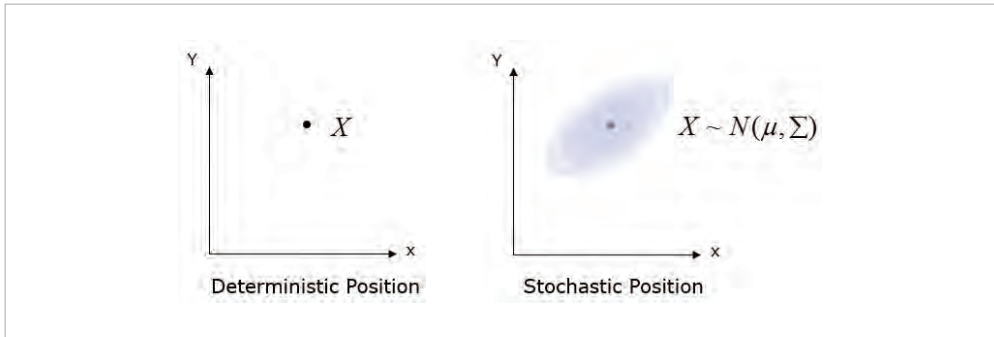


그림 12-9 상태량 X 의 확률 기반 표현

관측기라는 특징을 토대로, 그림 12-9와 같은 상태량을 관측하는 경우를 생각해보자. 먼저 초기 상태에서 위치 벡터 X 가 있다. 이동 로봇이 움직이게 되면, 위치 벡터 X 가 변화할 것이고 바퀴의 속도에 따라 Jacobian 행렬로 로봇의 위치가 변경되지만 정확한 위치는 슬립에 의해 알 수가 없는 상황이다. 그림 12-9의 경우, 현재 위치는 평균과 분산 값을 통해 어느 방향이 더 정밀한지를 표현해 주고 있다. 분산 값이 적은 방향이 좀 더 정밀함을 알려 준다.

칼만 필터는 매번 로봇이 움직일 때마다 바퀴의 속도를 토대로 로봇의 위치를 계산해낸다. 하지만 이 위치는 불확실하며 시스템인 로봇의 이동에 따라 슬립과 같은 오류가 포함되어 있다. 먼저 센서를 통해 외부를 관찰해보자. 센서는 글로벌 좌표계 상의 정보를 측정해내는 기능이 있으나, 측정 오차가 포함되어 있다. 로봇의 이동 모델에 따른 정보와 위치를 측정하는 센서 정보의 차이를 통해, 현재 위치가 어느 정도 오차를 포함하고 있는지를 계산해낸다.

이러한 방법은 우리가 실제로 먼 거리를 이동하며 현재 위치를 추정하는 것과 비슷하다. 칼만 필터의 수식에 대한 이해보다 개론적인 이해가 먼저 필요하다. 처음 위치는 알고 있으나, 십 여분 걸어가면 현재 위치가 어느 정도쯤 될 거라는 예상을 할 수 있다. 하지만 이 결과는 부정확하기 때문에, 멀리 있는 산이나 지형을 보며 움직인 거리를 측정할 수 있다. 이 경우에도 측정 오차가 있어서, 현재 위치에 대한 예상과 측정 간의 관계를 계속 보정하면 현재 위치에 대한 대략의 추정이 가능해진다.

칼만 필터의 경우 예측과 보정의 두 단계로 나누어져 예측 부분에서 많은 혼란을 유발하는데, 여기에서 예측은 학습 기법을 사용한 장기 예측과 무관하다. 정확히 현재 상태량을 토

대로 시스템 모델의 다음 단계를 계산하는 것에 해당한다.

직관적인 이해를 위해, 이러한 예측을 사용하지 않으면 어떻게 될지 고려해 보자. 로봇이 어떻게 움직였는지 고려하지 않고, 센서만을 이용하여 현재의 위치를 찾는 경우에 해당할 것이다. 이는 해당 지역의 지도와 현재 측정된 값만을 이용해서 위치를 찾는 것으로, 현재 위치가 특징을 가지고 있다면 위치를 찾는 것이 수월하겠지만, 특징이 없는 초원이라면 측정만으로 위치를 찾는 것에 한계가 있다. 센서를 통한 측정이 없다면 이는 앞서 언급한 것처럼 장기적 움직임에 대해 수치 적분에 의한 오류가 증가하게 될 것이다. 따라서, 현재의 움직임 정보와 측정 결과를 토대로 관측하는 방식이 필요하다.

이러한 현재 위치에 대한 관측은 위치 인식(Localization)으로 불리는 매우 오랜 역사를 가지고 있다. 현대적인 위치 인식이 이루어진 사례는 아폴로 11호의 달 착륙이다. 우주 공간 안에서 현재의 위치를 정확히 파악하여 궤도 수정을 하기 위해서, 이동 오차와 측정 오차를 관측의 형태로 처리한 사례이다.

이동 로봇에서는 관측이란 문제를 제외하고는 위치 추정에 대한 내용을 설명할 수가 없다. 이동 로봇의 초기에는 칼만 필터를 이용한 위치 추정이 시도되었고, 이후 연산량을 줄이기 위해 파티클(Particle) 필터를 도입하여 Monte-Carlo 방식의 확률 분포를 추정하는 방식으로 변화되었다. 현대에 이르러 사용되고 있는 ORB(Oriented FAST and Rotated BRIEF) 방식 또한 그래프 최적화를 통해 위치를 추정하는 방식이 사용되고 있다. 전통적인 관측은 모델과 측정에 따른 오차를 줄이는 방법인 데 비해, 그래프 최적화는 모델을 통해 먼저 현재 위치를 추정하면 GICP와 같은 매칭 기법의 초기 위치 오차를 줄여 빠르게 수렴하는 장점을 가질 수 있다. 이처럼 모델과 측정에 따른 오차를 줄이는 관측은 이동 로봇의 주요 분야라 할 수 있다.

3. 자율 주행

3.1 기술적 정의

자율 주행 차량에 대한 결과물이 등장함에 따라, 언제, 어떻게 자율 주행 차량이 등장하는

가에 대한 대중적 관심이 증가하고 있다. 본 절에서는 자율 주행의 단계적 접근에 따른 사례를 통해 주행에 대한 문제점을 다루어 보고자 한다.

다음은 현재의 자율 주행에 대한 단계를 구분하는 목적으로, 국제 자동차 기술자 협회(SAE)에서 정의한 자율 주행 기술 5단계이다. 0단계는 운전자에 의한 수동 조작으로 포함하지 않았다.

표 12-1 자율 주행 기술 5단계

Level	Function
1. Driver Assistance	The Lowest level of automation, ex) Adaptive Cruise Control
2. Partial Automation	Advanced Driving Assistance System(ADAS) controls steering and accel/deceleration. Ex) Lane keeping/following assistance (LKA/LFA) → Most cases like Tesla
3. Conditional Automation	Environmental detection is required. Ex) traffic signal Human caution is still needed.
4. High Automation	Machines intervene if something goes wrong. Ex) No human interaction in most cases.
5. Full Automation	No human. Vehicles drive as you do.

레벨 1은 차량과의 전방 추돌을 방지하기 위한 적응형 크루즈 제어를 포함한다. 적응형 크루즈 제어(ACC)는 80년대 후반 등장한 기술이나 최근 자율 주행 차량에 대한 관심도가 높아지면서 많은 차량에 옵션으로 추가되었다.

레벨 2는 차선 이탈 경고(LKA) 및 차선 추종 기능(LFA) 기능이 대표적이며, 차선을 차량이 인지하여 차선 이탈 시 운전자에게 경고를 주거나 자동으로 차량이 차선을 따라 핸들을 조작하는 부가 장치를 의미한다. 경우에 따라 LKA는 레벨 1에 포함되기도 한다. 최근 ACC와 LFA 기능이 추가된 차량이 급증하며, 자율 주행에 대한 관심이 높아지는 이유가 되기도 하였다.

레벨 3은 환경에 대한 인지, 사물 인식이 포함되어 기존 교통망의 신호등, 보행자 등을 인식하고 이에 따라 운전하는 기능을 의미한다. 하지만 여전히 운전자의 주의가 필요하다. 많은 논란을 불러일으키는 테슬라 차량의 경우, 보행자 및 신호등 인식이 추가되면서 자율 주행에 대한 기대감을 높이는 결정적 원인이 되기도 했다.

레벨 4는 차량이 자율주행을 담당하며 상황에 따라 운전자가 개입하는 수준의 주행 성능을 의미한다. 대부분의 경우 운전자가 직접 운전하지 않지만, 위험 상황에서 운전자가 개입할 수 있다.

레벨 5는 운전자 개입 없는 차량의 완전 자율 주행을 의미한다.

이러한 자율 주행 기술의 구분은 현 시점에서 차량 간 기능을 분리, 표현하는 용도로 사용되지만, 이러한 레벨 구분은 적절하지 않다고 생각된다. 레벨 3과 4의 기술 수준을 표현하기에 부적절하며, 보행자와 신호등의 인식이 레벨 3을 의미하지도 않는다. 최근 레벨 4에 도달하기 위한 많은 선행 연구들이 진행되지만, 대부분 저속으로 운전하고 있어 일반적인 도로에서의 자율 주행 성능과도 부합되지 않는다. 아마도, 레벨 3, 4라는 구분은 향후 더 세부적인 사항으로 나뉠 것이며, 각각의 성능 검증과 인증 절차가 뒤따를 것으로 전망한다.

3.2 차선 추종 기능(LFA)

본 절에서는 자율 주행에서 언급되고 있는 레벨 2의 차선 추종 기능에 대한 시뮬레이션을 수행해보고자 한다. 레벨 2의 경우 90년대에도 가능했던 기술이며, 이러한 문제를 해결함에 따라 지능적 문제를 내포하는 레벨 3, 4단계의 접근이 얼마나 힘든 요소인지 추측해보고자 한다.

LFA 기능을 위해 다음 그림 12-10처럼 대형 트랙과 차량을 시뮬레이션하였다. 차량의 경우, 이동 로봇의 기본 수식인 Jacobian 행렬을 이용하여 직선 속도 v , 회전 각속도 w , 조향 각도 간 관계를 이용하여 모델링한다. 차량 속도와 회전 각속도는 조향각에 의한 구속조건이 적용되어 자동차의 움직임을 표현한다. 주어진 양쪽 바퀴의 각속도는 로봇 청소기와 마찬가지로 수치 적분에 의해 이동 거리를 시뮬레이션으로 표현한다. 차량은 현대 산타페를 대상으로 하여, 핸들각을 입력하면 앞바퀴의 조향각이 조절되는 방식으로 적용되었다.

3.2.1 영상 기반 차선 추출

차량의 좌, 우측은 카메라를 이용하여 차선을 인식한다. 차선 인식의 경우, 측정 오차를 줄이고 차선이 끊기는 경우를 고려하여 관측기로 구성하는 경우가 많다. 차선 인식을 통해, 차량 주변에 가상의 벽이 있는 것처럼 모델링할 수 있고, 그림 12-11처럼 차량 주행 방향에 대한 상대 각도로 차선을 표현할 수 있다.

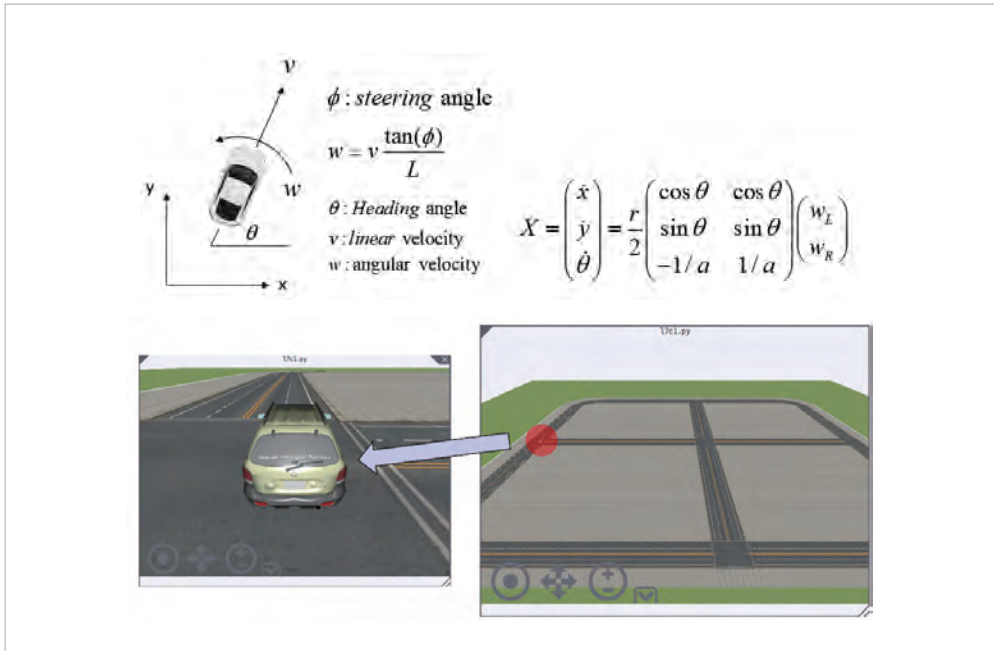


그림 12-10 자동차 및 테스트용 트랙을 통한 시뮬레이션 공간

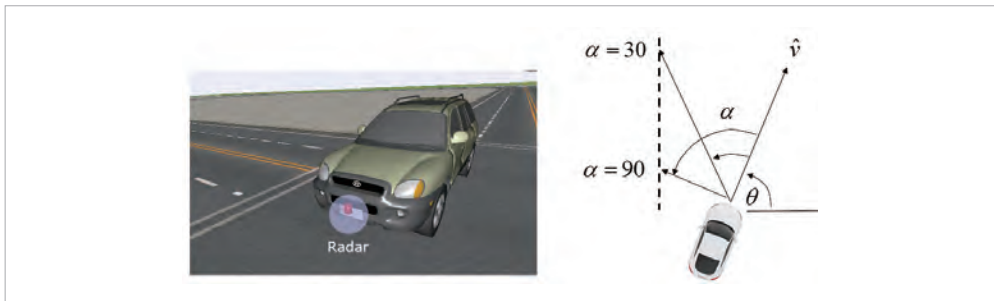


그림 12-11 전방 레이더 센서 및 좌측 카메라를 이용한 측면 차선 감지

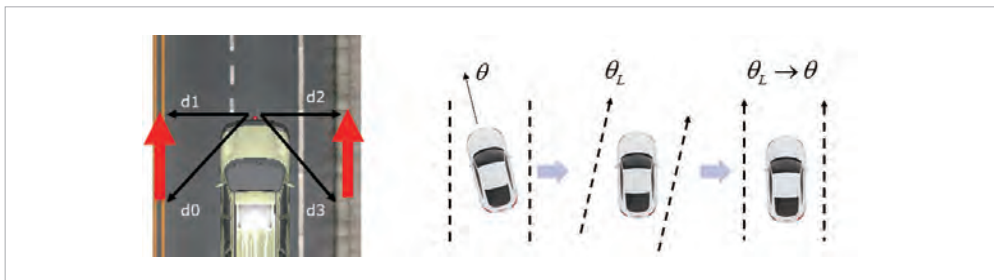


그림 12-12 양쪽 차선 벡터 추출 및 차선 벡터를 차량 진행 방향에 맞추도록 제어

3.2.2 차선 방향 추출

차량 주변의 차선을 가상의 벽으로 인식하기 때문에, 차량이 진행함에 따라 양쪽 차선의 변화하는 방향 벡터를 추출할 수 있다. 그림 12-11의 우측 그림처럼, 차량의 진행 방향에 대해 어떠한 각도로 차선 벡터를 구하는가에 따라 코너링 시의 성능에 영향을 미친다.

그림 12-12처럼 90도 근방의 거리만을 이용하게 되면, 라인 트레이서처럼 차량의 앞부분 정보만 활용하게 되어 코너링이 매우 어렵게 된다. LFA와 라인 트레이서의 기능 자체는 같지만, 차선을 벡터 형태로 인식하여 차선 추종을 부드럽게 변경하는 점에 차이가 있다. 90도 및 120도 근방의 차선 정보를 통해 양쪽 차선의 벡터를 추출하여 테스트하였다. 이는 LFA 기능이 부착된 차량의 카메라가 처리하고 있는 영역과 유사하다고 할 수 있다.

그림 12-13은 각도에 따른 추종 능력 테스트 결과로, 첫 번째 결과처럼 너무 넓은 각도에 대해 차선 벡터를 추출하면, 코너링 시에 느리게 동작하면서 우회전 시에 좌측으로 선을 넘어가게 되고, 세 번째 결과처럼 너무 좁은 각도를 이용하면 차량이 빠르게 대응하여 안쪽으로 넘어가게 된다. 이러한 결과는 다음 절의 PD 제어기 Gain 값과 차선 벡터의 각도 조절을 통해 결정하였다.

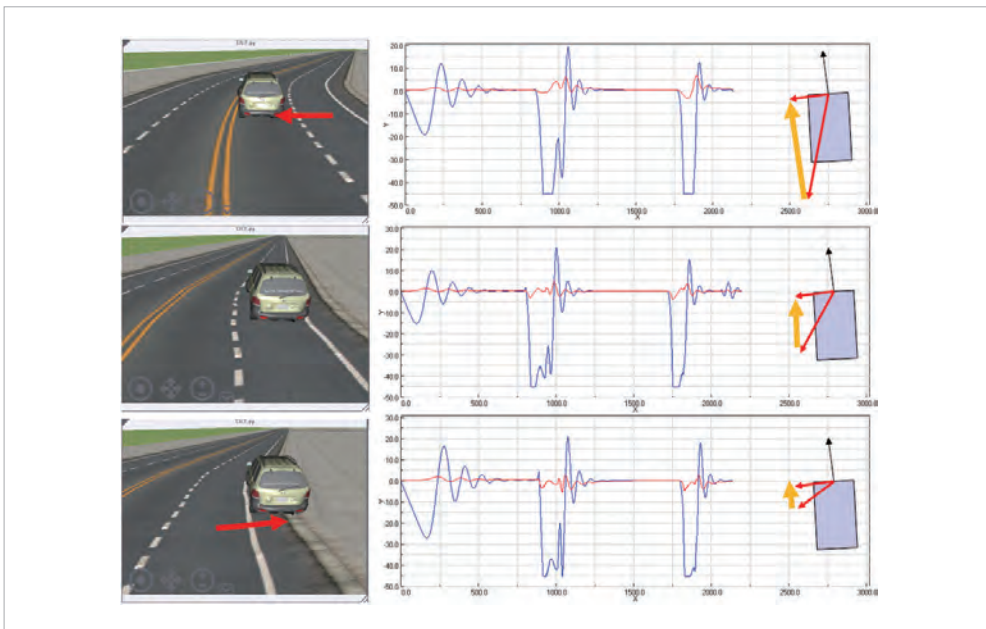


그림 12-13 측면 측정 각도에 따른 추종 능력 테스트

3.2.3 코너에서의 차선 추종

LFA 기능의 목적이 차선을 따라 이동하는 것이므로, 현재 차량의 진행 방향을 측정된 차선 벡터와 동일하게 유지하는 것이 LFA 제어의 목표이다. 따라서 그림 12-12처럼 제어를 설계하면, 간단히 PD 제어를 통해 차선을 추종하는 기능이 구현된다.

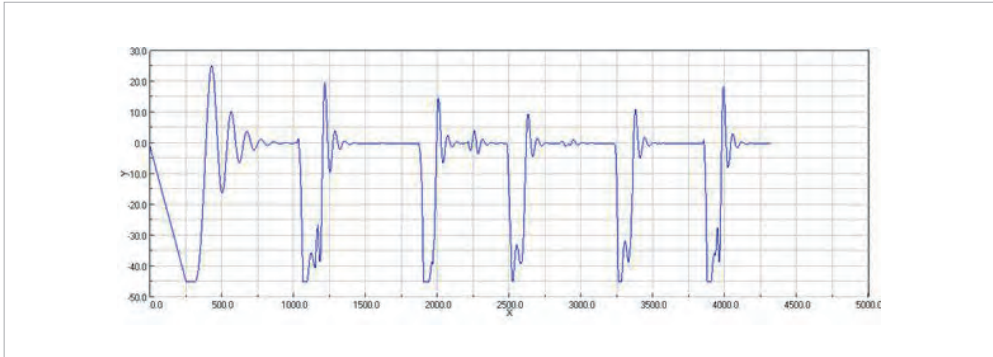


그림 12-14 LFA 기능에 대한 차량 조향각 제어 결과

현재 트랙에서는 차선을 따라 코너에서 우회전하며 차선을 쫓아가도록 되어 있다. 이때, 코너를 돌고 나면 차량의 속도에 따라 D 제어의 중요성이 부각된다. 그림 12-14를 보면, -45도로 핸들이 꺾여 있는 상태에서 출발하게 되면 속도에 따라 핸들을 최대 좌우 20도로 꺾으면서 방향을 잡게 된다. 이후 차량이 안정적으로 차선을 쫓아가는 것을 알 수 있다. 제어의 관점에서 보면 급격한 변화가 발생하는 코너를 지나 목표값인 차선 벡터의 각도에 수렴하는 과정에서 D 제어의 성능이 부드러운 코너링과 직결된다.

그래프의 가로축이 100스텝 정도 지날 때에 첫 번째 코너가 등장하고 핸들을 최대 -45도 까지 꺾어 우회전을 시작한다. 코너를 도는 과정에서 방향 오차를 감소하기 위해 몇 번의 급격한 핸들 방향 전환이 일어나고 이후 차량은 다시 차선을 따라 안정적으로 직진한다.

이러한 코너 부근에서의 LFA 기능은 조향각을 변경하여 차선을 맞추는 PD 제어의 영향력이 잘 드러난다. 코너를 돌아 나오는 경우 차선을 추종하기 위해 핸들이 좌우로 크게 변경된다. 많은 운전자들이 이처럼 급격한 핸들 전환을 불편하게 느끼기 때문에, 실제 LFA에서는 강한 D 제어를 통해 이와 같은 요동이 발생하지 않도록 한다. 이는 LFA 기능이 켜진 경우, 운전자가 핸들이 무거워지는 D 제어의 효과를 느끼는 것과 동일하다.

역으로 레이싱과 같이 고속으로 코너링하는 경우, 조향각과 코너 방향이 서로 반대로 되도록 핸들을 빠르게 전환하는 기능이 LFA 기능상의 PD 제어에서 발생하고 있는 것을 볼 수 있다.

이와 함께, 양쪽 차선 벡터의 끝점 간 거리를 이용하여 차량이 양 차선의 중앙으로 이동하게 하는 기능도 필요하다. 그림 12-12의 차선 추종을 위한 제어 기능과 함께 차선 중앙으로 이동하는 핸들 조향각 제어기를 통해 차선을 쫓아 움직이는 LFA 기능 구현이 가능하다.

3.2.4 감속에 따른 코너링 품질 개선

LFA 기능을 경험한 많은 운전자들은 일반적인 운전 스타일과 다르게 코너에서 속도를 줄이지 않는 LFA의 특징을 언급하곤 한다. 현재 대다수의 LFA 기능을 탑재한 국내 차량의 경우, 코너에서 속도를 줄이지 않고 있어 운전자들이 당황하는 경우가 있다. 본 절에서는 PD 제어를 통해 구현된 LFA 기능에 간단히 코너를 인식하는 기능을 추가하여 코너에서 속도를 조절해 보고자 한다.

LFA 기능으로 코너를 인식하기 위해서는 코너에 진입하기 전에 먼저 코너의 존재를 파악하고, 속도를 떨어트려 원활한 코너링이 되도록 하는 것이 필요하다. 차량의 좌우에 부착된 카메라의 경우, LFA를 위해 차량의 옆(90도)과 뒤(120도)를 파악함과 동시에 전방을 감지하는 것이 요구된다.

차량 앞쪽의 카메라는 전방의 차선 변화 감지에 유리하기 때문에, 이를 활용하면 전방의 차선이 코너링이 먼저 시작되는 것을 감지할 수 있다. 하지만 앞에 다른 차량이 위치하고 있으면, 시야각이 좁아지고 앞쪽의 차선이 변화되는 것을 감지하기 어렵다.

운전자의 높은 시점과 달리, 차량 전방에 부착된 카메라는 멀리 보기 어려우며 특히 다른 차량 때문에 영상 처리를 통해 차선만을 정확히 감지하는 것에 대한 불확실성이 증가할 수 밖에 없다. 또한 전방의 차량 때문에 전방의 코너 감지가 안 되고 있는 상황에서, 갑자기 앞차가 차선 변경을 통해 옆으로 이동하는 경우 코너에 대한 대처가 느려져 속도를 줄이지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

LFA 기능에서 코너에서의 속도를 줄이는 기능은 이러한 주변 상황에 대한 인식과 판단 이유로 구현에 어려움이 있다. 오히려 앞선 차량이 수동 운전으로 속도를 줄이게 되면, 적응형 크루즈 기능으로 속도를 줄이는 경우가 생기는 상황으로, 대다수의 LFA 기능은 지능형

판단보다는 제어기에 의존하는 보조 기능에 불과하다고 할 수 있다.

코너링에서의 감속을 위해 전방의 차선 정보를 사용해보자. 차량의 앞부분 차선을 추출할 수 있다면, 진행 방향에 대한 각도가 작을수록 먼 거리를 사용하며, 각도가 90도에 가까워질수록 차량 주변의 근거리를 측정하게 된다. 적절한 거리를 측정하기 위해 다음처럼 여러 각도에 대해 테스트하고, LFA 기능을 적용해 보았다. 그림 12-15와 같이, 전방 차선 벡터와 LFA 용의 주행 차선 벡터를 비교하면 코너 진입 전의 벡터 간 차이가 확실한 차이를 보여준다.

파란색 선이 LFA 기능에 따른 핸들 조향각, 빨간색 선이 인식된 왼쪽 차선의 벡터 방향, 초록색 선이 전방 주시에 따른 전방 차선 벡터의 방향을 의미한다. 직선 도로에서는 초록색과 빨간색으로 표기된 각도 간의 차이가 거의 없으나, 전방에 코너가 등장하면 차이가 발생하기 시작하며 코너에 들어서면 가장 큰 차이를 보여준다.

따라서, 두 가지 각도의 차이를 통해 코너를 감지하면, 서서히 브레이크를 밟아 속도를 줄이며 진입할 수 있다. 물론 이때, 차량의 속도와 코너의 변화 정도를 사용하면 조금 더 우수한 성능의 코너 진입 속도 조절이 가능하지만, 코너의 변화량을 예측하는 것은 한계가 있다. 이러한 이유로, 코너 진입 전의 속도 제한 표지판을 인식하거나 또는 GPS 정보를 이용한 정밀 지도를 활용하는 것도 가능하다.



그림 12-15 전방 차선과 차량 주변 차선과의 각도 차이를 통한 코너 진입 감지

차량의 경우, 바퀴의 스레드 틈새에 따라 마찰력과 배수력 등이 변화한다. 사계절이 있는 날씨에서는 특히 바퀴의 슬립에 의한 불확실성이 증가하며, 도로 위의 모래, 작은 돌, 파편 등에 의해서도 주행 성능이 변경된다. 사용된 LFA 기능은 표준편차 0.01 정도의 노이즈가 포함된 환경으로, 빠른 이동 속도 때문에 코너에서 차선 인식이 실패하면 차선을 이탈할 확률이 매우 높다.

3.2.5 운전자 보조 시스템과 자율 주행

이러한 단계를 통해 구성된 LFA 기능은 지능적 요소와 거리가 있는 단순한 제어기 수준에 불과하다. 따라서, LFA기능은 보조 기능에 불과하며, 끼어들기, 차선 변경 등 주행 중의 핵심적 요소가 빠져있어 대중이 기대하는 자율 주행과는 거리가 크다.

레벨 2의 경우, 고속 도로 주행에 적합한 보조 기능이며 코너링 시의 적절한 속도 감속, 전방 장거리 주시의 한계성 등 보완할 문제점이 여전히 많은 보조 기능에 해당한다. 고속도로

가 불비거나, 앞차의 감속에 의해 LFA 기능에서 ACC, 적응형 크루즈 효과가 나타나는 것이 현재의 LFA 감속이다. 또한 시내 주행 시에 이러한 차선 추종 기능을 포함한 레벨 2는 거의 도움이 되지 않는 기능이다.

레벨 3의 구성을 위해서는, 보행자, 신호등의 검출과 함께 주변 차량의 이동을 고려한 차선 변경, 코너링 시의 속도 조절, 앞으로 끼어든 차량의 속도와 전방 도로 상황에 따른 속도 조절 여부 등 다양한 “운전 자체의 지능형 모델”이 필요하다. 또한 레벨 2와 3 간의 격차가 너무 크기 때문에 당분간 레벨 3에 해당하는 차량이 등장하기도 어려울 것으로 보인다.

엄격히 말하면, 레벨 2, 3, 4에 해당하는 시스템은 대중이 생각하는 자율 주행과 거리가 멀다. 안전을 고려한다면 4단계까지도, 로봇 분야의 자율 주행 기술의 확장에 불과하고, 안전을 필수적으로 고려하는 자율 운전이라 보기 어렵다. 또한, 이러한 기술적 한계성이 명백한 기능을 자율 주행으로 내세워 기술 혁신과 고부가가치로 고려되는 것도 다소 의외의 현상이라 할 수 있다.

이러한 자율 주행 시스템에 대한 간단한 분석을 통해, 이동 로봇의 두 가지 문제인 위치 인식과 주행 성능 중 하나인 주행에 대해 이해할 수 있다. 일반적인 이동형 서비스 로봇의 경우, 위치 인식과 로컬 영역에서의 장애물 회피에 대한 중요도가 높은 반면, 차량과 같은 자율 주행에서는 주행 성능이 더 문제가 된다.

현재 이동형 서비스 로봇의 경우, 한 점에서 다른 점으로 (Point-To-Point) 이동을 하기 때문에 이러한 주행 성능에 대한 관심이 상대적으로 적다. 하지만 현재의 서비스 기능이 향상될수록, 여러 대의 서비스 로봇이 움직이는 환경에서 태스크의 최적화 및 다자간 회피 성능 등, 주행 자체의 지능화를 통한 주행 성능 향상에 대한 관심이 더욱 증가할 것으로 기대된다.

4. 매핑의 개요

이동형 로봇에서의 주요 쟁점인 위치 인식과 주행 성능 중, 위치 인식과 관련한 문제점 중 지도 작성 부분을 다루어 보고자 한다. 위치 인식에는 현재 위치를 추정하기 위해 칼만 필터

터, 파티클 필터 등의 위치 분포를 이용한 방법론과 최근의 ORB를 이용한 그래프 방식의 SLAM까지 다양한 방법론이 적용되고 있다.

이러한 방법론의 핵심에는 지도가 있으면 지도 위의 위치를 인식할 수 있으나, 위치 인식이 안 되면 지도를 그릴 수 없다는 데 있다. 위치 인식과 지도 작성(Mapping)에 해당하는 문제를 동시에 수행하는 것을 SLAM이라 정의한다.

지도 작성의 경우, 단순한 측정이나 결정론적 방법과 다르게 지도를 확률적으로 구성한다는 것에 큰 차이가 있다. 간단히 측정된 결과는 결정론적인 값이 아니라, 측정 결과가 확률적 분포를 가지고 있고 현재 위치도 정확하지 않은 분포 형태이기 때문에 이를 고려하여 지도 자체도 확률로 표현되는 것이다. 이러한 방식은 기존의 모델링 기반 로봇 연구 분야와 다르기 때문에 확률 기반 문제의 사례로써 다루어 보고자 한다.

최근 사용되는 이동 로봇의 지도 작성, 매핑은 크게 격자를 이용한 방식과 주요 특징점을 이용한 그래프 방식으로 구분된다. 격자 지도 방식은 로봇의 태스크 공간을 격자 형태로 촘촘히 분리하고, 각 격자의 비어 있음 또는 벽과 같은 장애물 등으로 채워져 있음을 확률적으로 묘사하는 방식이다. 격자 방식이 공간 전체를 대상으로 함과 달리, 그래프 방식은 주요 특징점을 노드로 구성하여 그래프를 이용하여 상호 연결 관계를 구축하는 지도이다.

로봇의 활동 공간이 상대적으로 적고, 공간 전체의 데이터화가 필요한 경우에는 격자 방식이 유리하지만 공간이 커질수록 또 정확성과 정밀성을 높이려 할수록 격자 방식은 연산량 측면에서 부담이 커질 수밖에 없다. 가정용 로봇 청소기의 경우, 정확도가 높지 않아도 되기 때문에 격자 지도 방식을 많이 사용하였다. 실제로 많은 로봇 청소기의 격자는 10cmx10cm 이고, 정확도는 15~20cm 정도로 구성된다.

본 절에서는 격자 지도를 통해, 지도 작성에 대한 개념 소개와 수식 일부를 설명하고자 한다. 격자 지도는 레이저 스캐너 또는 카메라를 사용하여 천장에서 정보를 뽑는 vSLAM 등, 측정 장치의 방식에 크게 영향을 받지 않고 적용할 수 있다. 본 예시에서는 레이저 스캐너를 통해 격자 지도 구성 및 관련 지식을 개론 수준으로 소개하고자 한다.

레이저 스캐너를 사용하는 경우, 로봇의 현재 위치 주변으로 거리 정보를 추출할 수 있다. 이러한 레이저 스캐너는 거리 기반 센서(Distance metric sensor)로서, 내부에 회전하는 모터와 회전자에 부착된 레이저 센서를 통해 사물까지의 거리를 측정하는 방식이다. 회전 속도

가 커질수록 좀 더 빠르게 거리를 측정할 수 있으나, 회전체에 의해 진동이 발생하기 때문에 최대 속도가 제한되어 있다. 또한, 최소 회전각에 따라 분해능이 결정되며 최근에는 0.5도의 고급형 제품과 1도 이상의 저가 제품으로 나뉜다. 스캐너의 부착 위치에 따라, 360도의 전방향 측정과 한쪽 면만 스캔하는 180도 측정 방식으로 나뉜다.

이러한 레이저 스캐너를 이용한 거리 측정은 정확도가 어떤 수준일까? 레이저를 사용하기 때문에 대상면의 반사율이 거리 측정 오차에 영향을 준다. 레이저 스캐너 같은 장치를 사용하는 경우, 측정된 값이 참값이 아니라는 사실을 이해하는 것이 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 측정이 아닌 관측의 문제이며, 모든 레이저 스캐너로 측정된 거리는 그 값이 확률적으로 표현된다.

이러한 요소가 매핑에 대한 이해를 위해 기존 방법과의 본질적 차이가 있는 부분이라고 생각된다. 다음 그림 12-16에는 두 종류의 센서에 대해 채워져 있음, 즉 장애물 등으로 점유되어 있음을 표현하는 확률 변화 그래프가 표현되어 있다.

왼쪽의 A 경우에는, 10m 근처에 장애물로 점유되어 있고, 오른쪽 B의 경우에도 약 10m 근처에 점유되어 있는 것을 알 수 있다. 하지만 거리에 따른 점유 확률은 다소 다르다. A의 경우는 10m 안쪽은 0.2 정도로 낮은 점유 확률을 보이지만, 10m 근처는 정확도가 높게 0.8 정도의 확률을 보인다. 반면 B의 경우는 10m 주변에서 점유 확률이 0.9로 A보다 높지만, 주변 거리인 7m부터 확률이 서서히 증가하여 10m 근처에서 최고점에 이른다. 이는 B의 경우가 A보다 10m 근처에서 높은 확률로 장애물을 점유 상태로 측정하지만 거리에 따른 정교함 측면에서는 다소 낮다는 것을 의미한다. A의 경우는 대부분 레이저 센서류에 해당하고, B의 경우는 초음파 센서에서 보이는 특징이다.

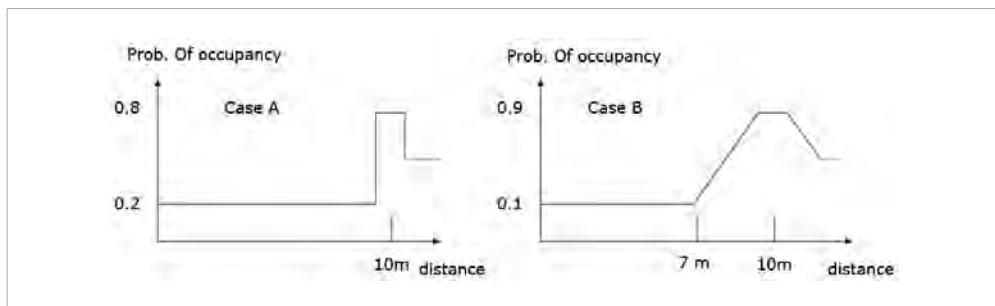


그림 12-16 거리 센서의 측정값 주변의 점유(Occupancy)에 대한 확률값

두 경우의 공통된 특징 중 하나는 10m를 넘어간 지점이다. 점유에 대한 확률이 0.5에 해당한다. 즉, 센서를 사용하여 거리를 측정했지만, 그 뒷면에는 무엇이 있는지 알 수가 없다. 얇은 벽이 있어 뒷면이 비어 있을 수도 있고, 벽 뒷면이 콘크리트로 막혀 있을 수도 있다. 따라서, 10m 뒤쪽은 점유 확률이 양 센서 모두 0.5이다. 이러한 거리 센서의 점유 확률을 격자 위에 옮겨서 생각해보자. 단순히 벽 또는 장애물에 의해 거리만을 측정하는 것이 아니라, 10m까지의 구간에 유리 벽이 있을 수도 있고 책상이 있을 수도 있다는 가정을 해보자. 레이저 스캔에 의해 책상의 윗부분이 검출되지 않고 다리만 검출될 수 있기 때문에, 점유 확률은 확실히 0으로 결정할 수 없다.

이처럼 한 번의 측정을 통해서 격자 위에 장애물이 있고 없고를 표기하는 것은 올바른 가정이 아니다. 격자의 점유와 관련하여, 그림 12-16에서 측정된 결과를 확률로 계속 업데이트하여 격자의 확률 기반 점유율을 표현하는 것이 맵핑의 주요 특징 중 하나이다. 그림 12-16은 Inverse Sensor Model이라 불리며 측정된 센서값을 거리에 대해 점유 확률로 표현했다.

다음 그림 12-17을 살펴보자. 자동차가 왼쪽에 위치해있고, 오른쪽 끝에는 벽이 있다. 중간에는 아무것도 없는 상황이라면, 여러 번의 측정을 통해 점유 확률을 업데이트하여 오른쪽 끝에 벽이 있음을 계속 감지하게 될 것이다. 따라서 오른쪽 끝의 격자는 확률이 높은 검정색으로 표현된다.

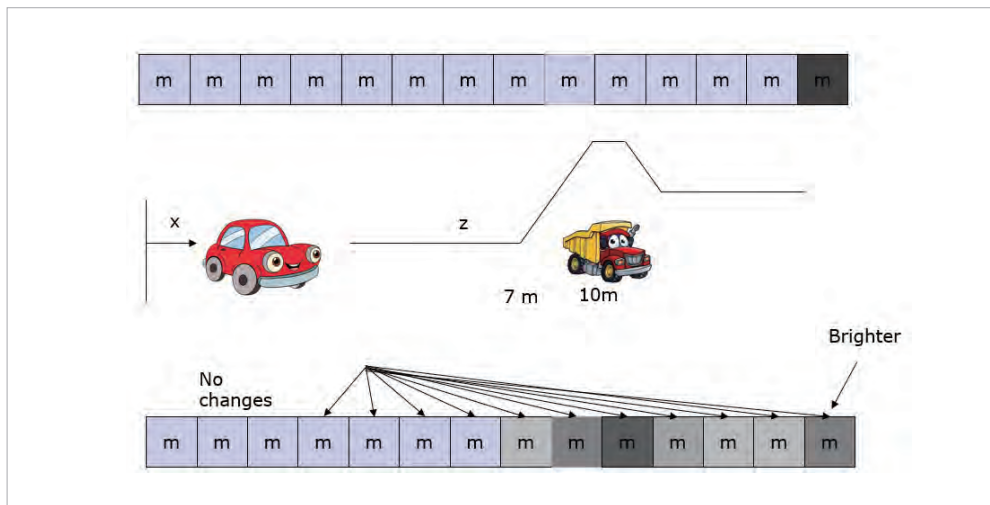


그림 12-17 Inverse Sensor Model에 의한 격자 지도의 점유 확률 업데이트

자동차가 X만큼 서서히 이동하는 중에, 트럭이 10m 거리에 나타났다고 가정하자. 이때 측정된 거리와 센서의 특징에 의한 Inverse Sensor Model에 의해 격자의 점유 확률을 업데이트하려고 한다. 현재 추정 위치로부터 오른쪽 끝까지의 점유 확률이 그림 12-16의 B 경우로 업데이트된다. 이에 따라 7m 근처는 진한 색으로, 10m 근처는 장애물이 예상되어 좀 더 진한 색, 즉 점유 확률이 높게 나타난다. 10m를 지나서는 다시 점유 확률이 낮아지며, 벽이 있어 가장 높은 점유 확률을 보였던 오른쪽 끝 격자는 점유 확률이 0.5이므로 다시 색깔이 흐려지는, 즉 점유 확률이 낮아지는 형태로 업데이트되었다.

이처럼 매핑의 핵심 요소 중 하나는 환경의 변화에 따라 격자 지도상의 점유 확률이 변동될 수 있다는 것이다. 주변 장애물 또는 지도 작성을 위해, 환경을 점유라고 하는 이벤트에 대해서 확률값으로 업데이트 및 표현하는 매핑을 통해 기존 로봇 관련 연구와 근본적인 차이점을 느낄 수 있다.

많은 실제 경우에는, 지도 작성과 위치 인식을 실시간 계속 적용하기보다는 특정 단계에서 지도를 작성하고 나면 매핑에 의한 확률 업데이트를 종료한다. 이후, 해당 맵에 대한 위치 인식을 수행하고, 맵에 존재하지 않는 움직이는 장애물을 추적하여 회피 경로를 생성하는 방식을 적용한다. 이러한 성향과 유사성을 갖는 쉬운 사례 중 하나는 강화학습이다. 강화학습은 상태공간에 대한 랜덤 움직임(Exploration)을 통해 보상의 기댓값을 업데이트하고, 학습이 완료되면 업데이트를 수행하지 않고 높은 기댓값을 추종하는 상태 천이(Exploitation)를 수행한다.

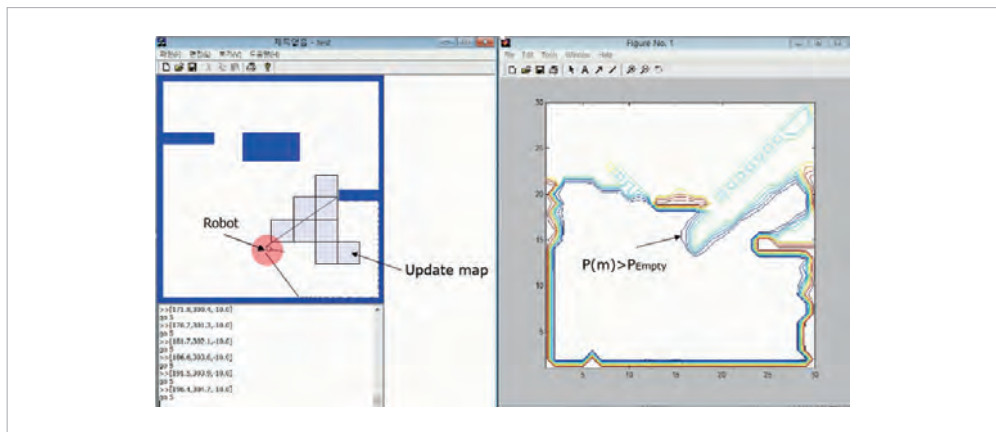


그림 12-18 2차원 격자 지도 내에서 거리 센서를 이용한 점유 확률 업데이트 예시

그림 12-18은 2차원 격자 지도를 작성하기 위해 레이저 스캐너를 이용한 점유 확률 업데이트의 한 사례이다. 왼쪽 그림과 같은 공간에서 로봇이 레이저 스캐너를 통해 거리를 구하고 격자 공간에 대해 업데이트를 수행해 나아가는 과정이다. 오른쪽 그림은 각 격자에 대한 확률 업데이트 결과를 의미한다.

로봇이 센싱하지 않은 영역은 점유 확률이 초기 상태인 0.5를 유지하고 있고, 센싱을 거듭함에 따라 아래 영역은 장애물로 인식, 점유 확률이 올라가 있다. 센싱에 의해 점유 확률을 업데이트해 나아가기 때문에 빈 공간은 점유 확률이 내려가서 낮은 수치를 보이고, 장애물 부분은 점유 확률이 높게 유지된다. 이러한 매핑은 현재 위치에 대한 오류가 많을수록 점유 확률이 흔들리므로, 특히 초기에 맵을 구성하는 경우 위치 오류에 대해 주의하는 것이 필요하다.

이러한 레이저 스캐너 기반의 격자 지도에 대한 업데이트는 연산량이 생각보다 높다. 레이저 스캐너상의 한 각도에 대해 Inverse Sensor Model을 적용하고, 이 레이저 방향을 관통하는 모든 격자를 찾아 업데이트해야 한다. 로봇의 활동 공간이 클수록 격자 공간을 많이 구성해야 하고, 현재 위치와 무관한 격자까지 업데이트하게 되면 연산량이 높아지게 되므로, 공간을 분리, 관리하여 주변 영역에 대해서만 업데이트를 수행하게 하는 것이 바람직하다.

이러한 지도 작성 및 위치 인식에서 특히 최근의 ORB SLAM의 경우, 속도 향상을 위해서는 자료 구조에 대한 이해와 적용이 필수이다. KD Tree와 해싱 테이블의 사용이 대표적이며, SLAM의 기능에 대한 이해 외의 자료구조의 적절한 사용, 다수의 Daemon으로 구성된 서비스의 관리 등이 실제로 많은 어려움을 유발한다.

네트워크 통신 및 시스템 통합 프로그래밍



1. 개요

로봇은 다수의 관절로 구성되기 때문에, 센서, 구동 장치를 통해 각 관절의 움직임을 관장하는 로컬 제어기와 각 관절 제어를 통합 운영하는 중앙제어기의 기능을 갖는 하나의 독립된 시스템이다. 또한 로봇 끝단에 부착되는 다양한 툴의 움직임을 제어하는 외부 인터페이스를 가지고 주변 장치와 물리적 상호작용, 정보 교환을 수행하게 된다. 이러한 로봇 시스템은 로봇 한 대의 단독 운영에 국한되지 않고, 다른 로봇과 동시 운영되거나 또는 대형 설비의 하나의 장치로 취급되어 통합 관리 운영될 수 있다.

로봇은 다양한 장치의 연결을 통해 주어진 태스크를 수행하는 시스템이며, 또한 다른 주변 장치와의 통합이 요구되는 시스템 특성을 갖는다. 이에 따라, 로봇은 다양한 CPU와 OS 플랫폼, 통신 방식, 네트워크화, 프로세스 관리 방식에 대한 이해와 시스템 통합을 위한 프로그래밍 수요가 높은 분야이다.

로봇의 시스템 통합은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 일반적으로 시스템 통합(System Integration, SI)은 공정 프로세스상의 로봇 도입에 따른 시스템 통합과 로봇의 정보 처리를 위한 모듈 간의 시스템 통합으로 나눌 수 있다.

전자의 경우, 대규모 설비가 도입되는 제조 분야에서 주어진 제조 프로세스상의 공정 처리 속도에 맞춰 로봇과 컨베이어, 피더 등의 주변 장치로 구성되는 동작 시퀀스의 통합을 의미한다. 최근 제조 분야의 로봇 활용과 관련 산업의 중요성이 부각되면서, 이를 로봇 SI로 부

르고 있다.

후자의 경우, 이러한 공정 프로세스상의 SI와 달리 로봇 시스템의 개발에 초점을 맞춰 HW, SW 모듈 간의 정보처리상의 통합을 시스템 통합으로 지칭하여 왔다. 기존의 HW 기반 로봇 시스템에 다양한 지능형 SW 기능이 추가됨에 따라, 영상, 음성, 터치 등의 다양한 모달리티 처리에 따른 복잡성이 크게 증가하였고, 이중 OS, 다양한 프로그래밍 언어 간의 시스템 통합과 모달 특성에 따른 프로세스 관리의 현실적, 실무적 어려움이 높은 상황이다. 특히 정보 전달의 통합은 OS 플랫폼 또는 펌웨어에 밀접하여 저수준의 시스템 접근이 불가피하며, 속도가 빨라 통신과 프로세스에 대한 기초 지식과 함께 다양한 경험과 노하우가 필요하다.

본 장에서는 로봇 시스템의 저수준에 해당하는 HW와 SW 간의 통신, 다양한 SW 모듈 간의 통신과 함께 프로세스 관리 및 구성에 대한 내용을 다루고자 한다.

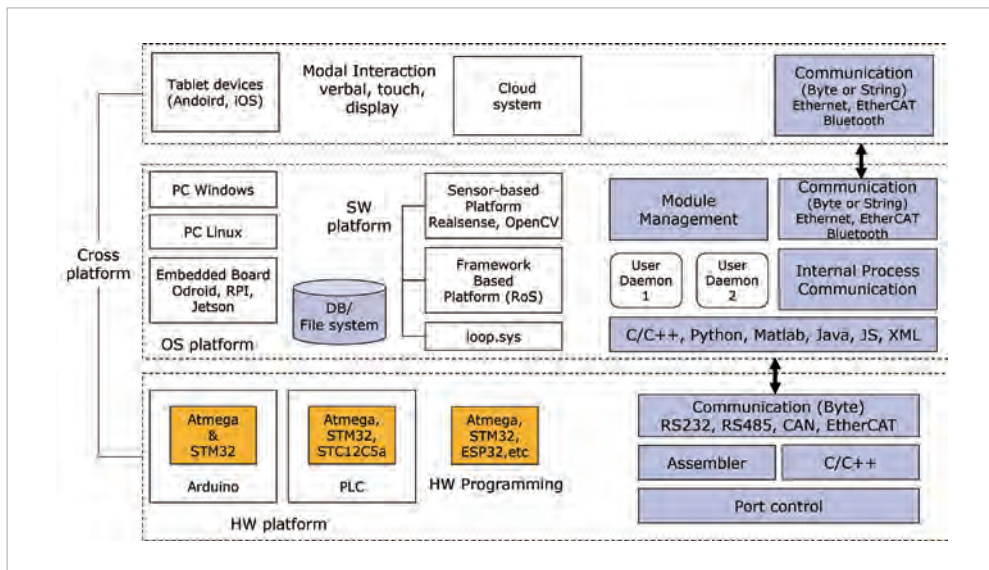


그림 13-1 로봇의 일반적인 시스템 구성

2. 시스템 구성 개요

로봇 시스템은 로봇의 다양한 유형과 기능이 집합되는 복잡한 시스템 중 하나이다. 이러한 로봇의 설계, 개발, 통합을 위해 기본적인 용어 및 초기 개념 설계상의 문제점을 다루어 보고자 한다.

2.1 시스템 구성도(System Architecture)

로봇 시스템은 외형상 단순한 기능을 수행하는 경우에도, 각각의 기능을 담당하는 모듈 간 통합 편의를 위해 다수의 계층 형태로 구성된다. 시스템 통합에서의 계층은 대상에 따라 다양한 방식으로 구성될 수 있지만, 로봇의 경우에는 다음의 3개 계층이 일반적이다.

로봇의 기본적인 센서, 구동부와 밀접한 관련이 있는 하드웨어 계층, 주변 장치 및 지능형 모듈 등 연산을 담당하는 오퍼레이션(Operation) 계층, 사용자 및 외부 단말과 상호작용을 위한 인터페이스(Interface) 계층으로 크게 분류할 수 있다.

다음 그림은 소프트뱅크의 Pepper 로봇의 주요 시스템 구성도이다. 하부의 하드웨어 계층은 로봇 센서 및 하드웨어 제어 보드로 구성되며, 중간 계층은 상호작용 설계, 영상 처리, 홈 복귀 등의 연산 기반 기능을 수행하며, 상단 계층은 사용자 상호작용을 위한 태블릿, 스위치, 터치 기능의 인터페이스 기능으로 구성되었다.

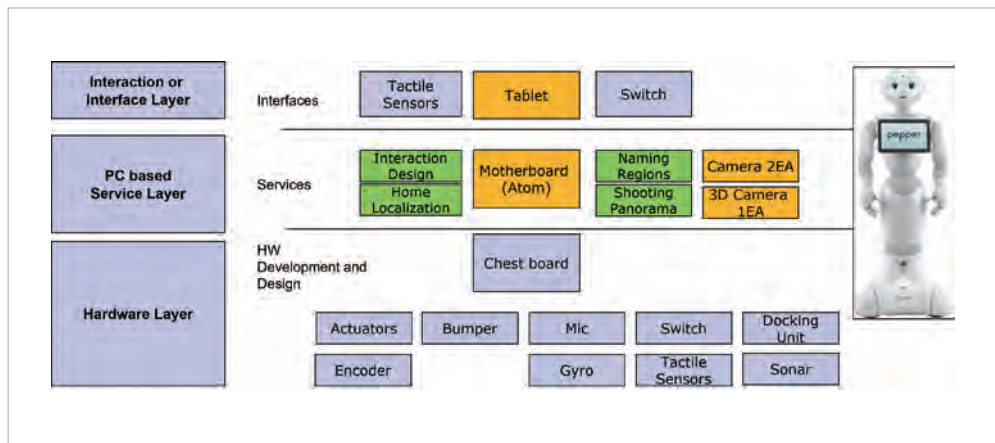


그림 13-2 Pepper 로봇의 시스템 구성도

이러한 서비스 로봇과 전혀 다른 형태의 로봇 시스템 구조를 알아보자. 다음은 테니스 서브 연습을 위해 영상으로 사람의 위치를 추적하고 공기 압력을 이용하여 공을 발사하는 태스크로 구성된다. 테니스 공을 발사하기 위한 팬틸트 구조, 공압 제어, 센서를 담당하는 하드웨어 계층, 플레이어의 위치 파악을 위한 영상 처리, 팬틸트 구조를 이용한 추적 기법, 발사하는 공의 속도, 거리 제어 기능을 담당하는 임베디드 장치로 Operation 계층이 구성되었으며, 휴대폰을 이용하여 서브 주기, 속도, 거리, 사용자 추적을 변화하는 인터페이스 계층으로 구성되었다.

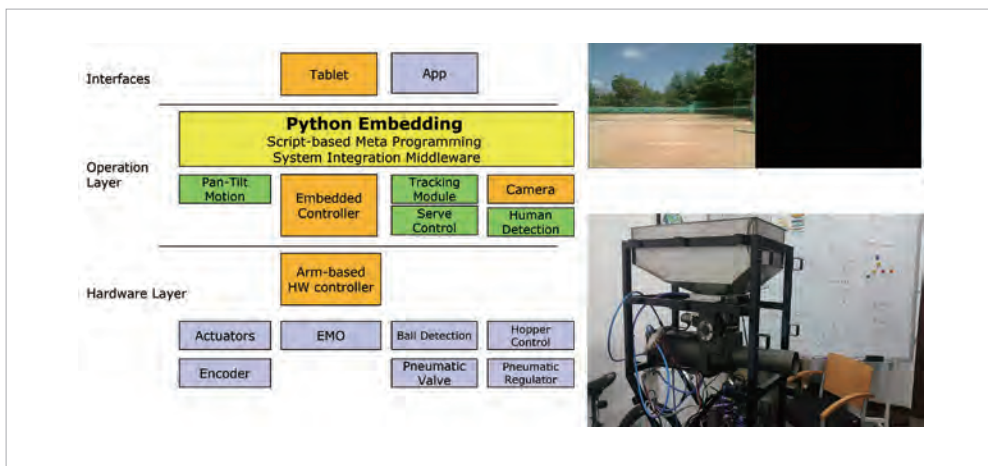


그림 13-3 자동 테니스 서브기 구성

이처럼 계층화된 구성은 로봇의 유형과 무관하게 HW와 SW를 동시에 사용하는 로봇 시스템에서 필수적인 요소라 할 수 있다. 서로 다른 OS와 언어가 사용되기 때문에, 계층 간 또는 모듈 간 정보 연결에 어려움이 발생하므로 보통 미들웨어(Middle Ware)라 부르는 통합용 플랫폼을 사용하기도 한다. 대표적인 미들웨어로써 ROS 프레임워크가 있다.

이와 달리 테니스 서브 연습기의 경우, 상위 수준의 통합 편의를 위해 파이썬을 사용하였다. 모든 Operation 계층의 모듈은 C++ 언어를 이용하여 개발되었으나, 파이썬 임베딩 기법을 이용한 인터프리터 환경을 추가하고 모든 C++ 모듈을 파이썬 모듈화하는 방식을 사용하였다. 인터프리터는 사용자의 명령과 그에 반응하는 상호작용 구조로 만들어져 있어 온라인 상태에서 기능을 수정하고 실행하기 편리한 구조를 갖는다. 이처럼 상위 계층에 수정이 용

이한 인터프리터 언어를 탑재하게 되면, 각 모듈 간의 튜닝 및 구성을 손쉽게 수정할 수 있으며, 특히 인터프리터의 특성상 온라인 상태에서의 수정이 용이한 장점이 있다.

로봇 시스템을 개발하는 경우, 하위 계층의 개발이 끝난 상태에서 상위 계층에서 하위 모듈을 재구성, 튜닝하는 과정이 빈번히 발생한다. 상위 계층이 인터프리터 기반의 스크립트로 구성된 경우엔 시스템의 전체 리셋 없이 스크립트의 반복 수정이 용이하다. 특히 하드웨어 계층의 리셋은 시간이 오래 걸리는 로봇의 초기화 및 물리적 변화를 유발하기 때문에 상위 계층의 개발 과정에 병목 현상을 일으키게 된다. 온라인 프로그래밍이 가능한 상위 수준의 인터프리터 및 스크립트 적용 방식은 높은 개발 효율을 갖는 방식에 해당한다.

2.2 네트워크 구성

로봇의 HW, SW 모듈 간의 통신은 다양한 프로토콜과 표준화된 통신 기법들이 있다. 대표적으로 컴퓨터의 주변 장치 간 통신에 사용되는 버스 방식인 USB가 있다. USB 방식이 등장하기 전에는 HW 통신에 많이 쓰이는 RS232가 마우스 제어 등을 위해 쓰였다.

이러한 컴퓨터 통신 방식의 발달은 로봇 시스템에도 그대로 적용되고 있으며, 로봇의 중앙제어기를 중심으로 주변 장치, 모듈 간의 통신에 활용되고 있다. 기존의 HW 장치 간의 통신에서는 장치 간의 연결 구성이 단순하여 비교적 연속적으로 구성되어 있었으나, 다수의 장치가 서로 물고 물리는 네트워크 구조가 등장하면서 통신의 시작점에 대한 중요성이 증가하게 되었다. 따라서 통신의 시작이 되는 서버와 이후 서버에 연결되는 클라이언트 구조가 등장하게 된다.

기존의 RS232 같은 장치에서는 서버와 클라이언트가 따로 없이 연결된 통신 선로를 따라 명령을 주고받는 헤드리스 서버 통신(Headless Server Communication)이 적용되었으나, 네트워크 구조에서는 통신의 시작인 서버와 이에 연결되는 클라이언트 방식이 요구된다. 헤드리스 서버 통신에서는 서버와 클라이언트 간 구별이 없어 통신이 연결된 두 모듈 간 실행 순서의 차이가 없으나, 일반적인 네트워크상의 서버-클라이언트 구조에서는 서버가 먼저 실행되고 클라이언트가 이후 연결되는 방식을 의미한다.

서버와 클라이언트는 인터넷 보급과 함께 이더넷 통신으로 보편화된 용어이지만, 정보 처리의 시작 주체와 종속 관계로 다양한 사례에 적용할 수 있다. 대표적으로 OS의 예를 들면,

Windows의 경우 모듈 간 통신을 위해 컴포넌트인 COM 기법이 적용되고 있으며 서버 역할을 하는 컴포넌트를 서비스라 지칭한다. 동일한 의미로 Linux에서는 OS의 다양한 서비스를 담당하는 프로세스를 데몬(Daemon)으로 부른다. 서비스와 데몬은 정보 처리 관점에서는 서버에 해당한다.

사례를 통해 로봇 시스템에서 모듈 간 통신을 위해 서버와 클라이언트 구성상의 문제점을 이해해보자. 다수의 로봇과 이를 관리하는 중앙제어기를 사용하는 경우로서, 서버와 클라이언트의 관계가 어떠한 구성이 유리한지를 고려해보자.

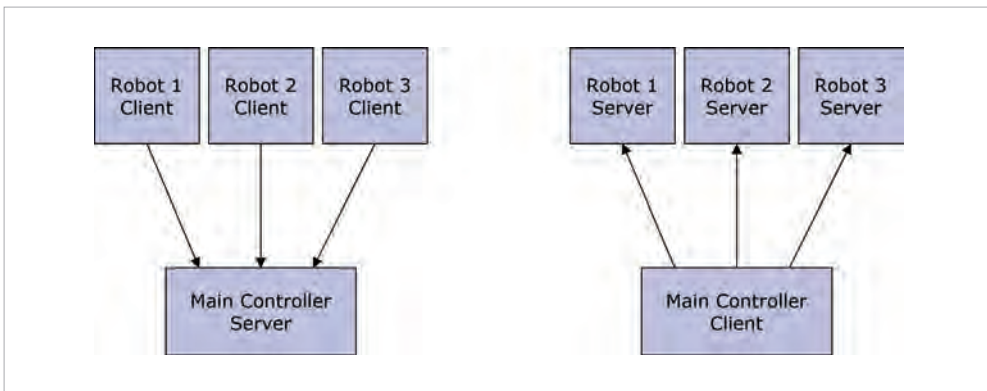


그림 13-4 다수 로봇과 중앙제어기에서 서버-클라이언트 관계

왼쪽의 경우, 중앙제어기는 모든 로봇을 통솔하며 명령을 제어하는 가장 중요한 역할을 담당한다. 이러한 중요성을 고려하여 중앙제어기를 서버로 사용하고, 다수의 로봇은 클라이언트로 중앙제어기에 접근하는 사례이다. 이 경우는 개발 단계 및 실제 사용에서 심각한 문제점을 내포하는데, 이는 각각의 로봇 시스템의 부팅과 로봇이 갖는 초기화 과정에 기인한다. 로봇 또한 시스템이기 때문에 부팅 과정이 필요하며, 특히 관절 각도의 초기화를 위한 적정 시간이 소요된다. 개발 단계에서 중앙제어기에서 로봇 명령을 일부 수정하면, 중앙제어기가 리셋되고 다시 모든 로봇의 초기화를 거쳐 중앙제어기에 접속해야 한다.

오른쪽의 경우는 중요도와 무관하게 정보 처리의 편의성을 위해 각각의 로봇이 서버 역할을 담당하고 중앙제어기는 클라이언트로 각각의 로봇에 접속하는 방식이다. 왼쪽의 경우와

달리, 각 로봇은 독자적 부팅과 초기화 과정을 거쳐 접속 대기 중인 상태이고, 개발 과정에서 중앙제어기가 리셋되면 서버의 기능을 수행하는 각각의 로봇 시스템에 접속하기 때문에 다수 로봇의 리셋이 필요 없어 개발 및 전체 시스템 초기화에 유리하다.

오른쪽 사례는 바로 OS의 서비스 또는 데몬 방식을 시스템 구성도에 활용한 것으로, 다수의 로봇은 자체 OS 및 CPU를 통해 초기화 과정을 거쳐 네트워크 하에 서버로써 대기하고, 중앙제어기는 응용프로그램의 역할을 수행하여 각 로봇에 클라이언트로 접근하는 예시이다. 보통 이러한 다중 시스템에서 중앙제어기는 중요도가 높지만, 중앙제어기가 굳이 네트워크상에서 통신의 시작인 서버일 필요는 없다. 따라서 주어진 문제에 맞춰 서버-클라이언트를 결정하는 것이 필요하다.

또 하나의 사례는 그림 13-5처럼 다수의 로컬 제어기가 리셋되는 과정의 문제점이다. 다관절 로봇에서 다수의 관절 제어를 위해 관절마다 로컬 제어기를 사용하고, 이를 네트워크로 연결한 경우이다. 앞선 그림 13-4 오른쪽 경우와 같이 모든 로컬 제어기가 서버로 동작하고 있다. 로컬 제어기는 허브를 거쳐 다른 OS와 연결되며, 로컬 제어기의 MAC 주소를 통해 허브에서 내부 IP 주소를 지정하는 방식이다.

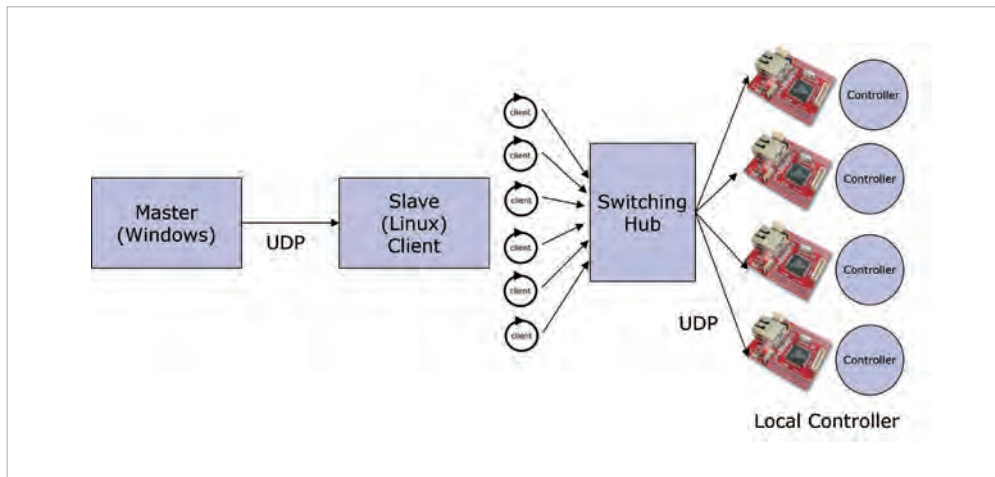


그림 13-5 다수의 로컬 제어기의 리셋에 따른 통신 연결 문제

이때, 전원을 넣으면, 로컬 제어기가 많으면 많을수록 네트워크 자체의 연결에 어려움이 있다. 로컬 제어기가 리셋되면, 자동으로 허브에 연결되어 서버로써 서비스 또는 데몬의 역

할을 수행하게 되는데, 중앙제어기의 접속과 무관하게 허브 자체의 연결 실패율이 높은 편이다. 이러한 현상이 왜 벌어지는 것일까?

소수의 로컬 제어기가 리셋되는 것과 달리 다수의 로컬 제어기가 리셋되면 그 순간에 허브에 동시 접속을 시도하게 된다. 동일한 CPU 및 펌웨어를 가지는 다수의 로컬 제어기가 전원 리셋에 따라 동시에 허브에 접속하게 되면, 허브는 이를 동시에 처리하지 못하게 된다. 유사한 사례를 DDOS 공격에서 찾아볼 수 있다. 다수의 네트워크 접속이 확률적으로 높은 수준에서 동시에 벌어지면, 네트워크 장비는 일부 연결을 인식하지 못하거나 버리게 된다. 따라서 다수 로컬 제어기가 동시에 접속되면, 허브는 이를 인식하지 못하고 일부 연결이 실패 처리된다. 이를 해결하는 방법은 무엇일까?

로컬 제어를 수동으로 하나씩 리셋하거나 또는 로컬 제어기의 네트워크 접속에 랜덤한 지연을 주거나 또는 연결 시도 후 특정 시간이 지나면 다시 연결하는 방식이 유일한 방법이다. 시간이 지나서 재연결하는 것은 PC 기반의 네트워크 응용프로그램인 웹 또는 FTP 등에서 많이 활용되고 있지만 빠른 응답이 필요한 경우에는 사실 좋은 해결책이 아니다. 네트워크 환경 하의 많은 장치들이 하나의 전원 버튼을 대신하여 여러 개의 전원을 순차적으로 켜주는 것 또한 이러한 동시 접속에 의한 딜레마를 해결하기 위한 것에 해당한다.

2.3 OS의 실시간성

오랜 기간 로봇 시스템 구성의 문제점으로 손꼽히는 것 중 하나는 OS의 실시간성 문제이다. 로봇 분야에서 특히 제어를 고려하는 경우, 실시간성은 단순히 빠른 응답을 의미하지는 않는다. 제어 분야에서 실시간성은 시간 지연이 있더라도 샘플링 간격이 일정한 것을 의미한다. 간단히 다음 PD 제어의 사례를 들어보자.

$$e = x_d - x$$

$$T(t) = K_p e + K_d \dot{e}$$

이때, D 제어는 시간에 대한 미분을 의미한다. 이를 이산화해 보자.

$$e_k = x_d - x_k$$

$$T_k = K_p e_k + K_d \frac{\Delta e_k}{\Delta t} = K_p e_k + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t} \quad (1)$$

앞선 식은 많은 컴퓨터 제어에서 사용하는 PD 제어의 대표적 사례이다. 오차 e 에 비례하여 출력을 내보내는 P 제어의 경우, Mass-spring 모델에 해당하여 에너지가 소비되지 않는다. 오차의 크기와 달리 오차의 변화량을 토대로 반대 방향으로 출력을 감소시키는 것이 D 제어의 핵심이다. 로봇 제어의 결과물에 큰 영향을 주는 것은 바로 D 제어이다. 빠르고 안정된 수렴성, 부드러운 움직임, 진동 제거 등 제어 성능에 필수적인 영향을 주는 것은 D 제어라 할 수 있다.

이러한 D 제어는 식 (1)에서 보는 것처럼, 단위 시간당의 오차 변화에 비례한다. 제어 주기인 Δt 에 초점을 맞춰 보면, 제어 주기가 조금씩 다르게 되면 어떠한 일이 발생할까?

$$K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t + \varepsilon} = K_d \cdot \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t}$$

양의 ε 에 의해 제어 주기가 의도하지 않게 길어지면, 간단히 K_d 값이 작아지는 효과를 유발한다. 댐핑이 작아지므로 원하지 않게 에너지 소비가 감소하며, 진동 제거가 덜 되고 움직임이 부드럽지 않게 된다. 그리고 이러한 성향이 랜덤하게 변경되면 댐핑이 작아져 시스템의 안정성에 영향을 주게 된다. 이와 달리 제어 주기가 매우 짧아지면, 즉 고속 제어를 하게 되면 Δt 가 작아지고, K_d 값이 이전보다 매우 커지는 효과가 발생한다. 따라서 댐핑에 의한 효과가 높아지는 현상이 벌어진다.

이러한 간단한 수식 분석을 통해서 다음 결론에 도달한다. 효과적인 제어기의 경우 제어 주기가 짧을수록, 일정할수록 D 제어 성능이 우수해지게 된다. 제어 분야에서는 복잡한 제어 기법, 보상 모델의 적용보다 제어 주기를 짧게 일정하게 만드는 것이 훨씬 큰 성능 향상을 보일 수 있다는 말이 있다. 그만큼 제어 주기의 실시간성이 갖는 의미가 높다고 할 수 있다. 이와 함께, 실시간성은 Time Delay Control(TDC)의 적용 여부와도 밀접한 관련이 있다. TDC는 로봇을 위한 전용 제어기로 개발되었으며, 중력 보상과 함께 강인제어기로 유명하다. TDC는 수치 적분에 의한 보상이 요구되어 실시간성이 반드시 필요한 제어기 중 하나

이다.

이러한 실시간성은 OS와 밀접한 관련이 있으며 최근에는 특히 실시간(Real Time) OS를 찾아보기 어려운 상황이다. 대표적인 RTOS로는 마이크로 커널을 사용하는 QNX와 RTX가 있다. QNX의 경우 20여 년간 사용되어 왔으며, 최근에는 개발환경이 편리한 RTX류의 방식이 유행하고 있다. RTX의 경우, CPU의 다중 코어 중 하나를 Linux에 배치하고 다른 코어로 Windows를 사용하는 방식이다.

이러한 상용 제품과 달리 Linux에 RT 커널을 사용하는 방식도 있다. 사실 OS의 유형보다는 커널이 RT 기능을 가지는 것이 핵심이기에, 유닉스 계열 OS에 커널을 교체하면 동일한 효과를 볼 수 있다. 하지만 최근 들어 Linux에서는 RT 커널의 지원이 끊기고 있는 실정이며, 하드웨어 연결의 엄격함 때문에 Preempt 커널 등 RT와 유사한 방식만을 제공하고 있다. Preempt 커널의 경우, 제어 주기가 비교적 안정적이며 유럽 입자 물리 연구소(CERN)에서도 많은 장치에 활용 중이다.

예전과 달리 최근에 실시간 OS를 사용함에 있어 가장 큰 문제점은 호환성이다. 실시간 OS는 실시간성이 보장되는 스레드(Thread)에 기반을 둔다. OS에 어떠한 외부 연결이 있더라도, 정해진 시간에 동작하는 RT 스레드가 제어에 필수적 요건이다. 커널 레벨에서의 RT 스레드 구현과 달리, 실제 응용 프로그램을 위해서는 RT 스레드 내에서 다른 스레드와의 데이터 연결이 필수적이다. 다른 스레드의 경우는 예를 들어 네트워크, 센서 연결이 이에 해당한다. 따라서 RT 스레드 내에서 일반 스레드의 데이터를 접근하는 경우, 실시간성이 깨지는 문제가 발생하기 때문에 RT 환경을 제대로 쓰기 위해서는 네트워크, 센서 등의 데이터를 얻는 모든 스레드 역시 RT 환경에서 동작해야 한다. 최근의 RTX 등의 고가의 RTOS는 데이터 연결을 위한 RT 드라이버 지원이 필수적 요건이며, 새로운 장치의 출현에 따라 RT 드라이버를 지속적으로 공급하고 있다.

이러한 고가의 복잡한 RTOS와 달리 저가로 구현하는 방법은 하드웨어 보드를 활용하는 것이다. 앞서 그림 13-5의 경우, Cortex 보드로 관절마다 로컬 제어기를 꾸며놓은 사례에 해당한다. 사실 모든 CPU는 내부의 타이머 인터럽트를 이용하여 무부하 상태에서 매우 정교한 실시간 루프를 구현할 수 있다. 하지만 PC 기반의 Windows나 Linux의 경우, 다양한 장치와 네트워크 환경에 놓여 있어 커널 레벨에서 실시간성을 지원하지 않고 있다. 물론

Windows의 경우에도 VxD 같은 드라이버 레벨에서 실시간성을 만들고 이를 시스템과 연결하면 저수준의 RT 문제 극복이 가능하나, 여전히 다른 장치와의 RT 호환성에는 어려움이 있다.

마이크로프로세서나 임베디드 기기를 로컬 제어기로 사용하는 경우, 시스템 전체에 대한 RT 유지의 어려움이 줄어들고 단일 루프에서 제어를 수행하게 되면 실시간성을 쉽게 구현할 수 있다. 외부 장치와의 실시간성 유지를 위해 폴링(Polling) 방식으로 접근하여 명령 큐에 담긴 내용을 제어기에서 수행하는 방식으로 보다 손쉽게 제어기의 RT 성능을 구현할 수 있다. 폴링은 실시간성과는 차이가 있으며, 루프 안에서 주기적으로 다른 장치의 상태를 모니터링하는 것을 의미한다. RT 스레드의 경우 정교한 주기마다 실행되는 반면, 폴링은 불규칙한 주기를 갖는 방식이다.

그림 13-5의 경우는 16 자유도의 수술용 로봇의 모든 관절 제어기를 Cortex 보드로 구성한, UDP 통신으로 초당 최대 15,000회의 양방향의 데이터 교환 사례이다. 높은 제어 샘플링 주파수 때문에 고품질의 제어가 가능하였으며, 경로는 상위의 PC에서 생성하고 로컬 제어기는 PD 제어만 담당하는 방식을 적용하였다.

OS의 실시간성 문제는 마스터와 슬레이브로 구성된 원격 제어에서도 자주 논의된다. 하지만 앞서의 실시간성은 제어, 특히 D 제어와 관련된 제어 주기의 일정함에 대한 논의이며, 원격 제어의 경우는 통신에 따른 시간 지연에 대한 문제를 의미한다.

원격 제어에서는 사용자가 마스터 장치에 입력을 넣으면 통신을 통해 원격 슬레이브에 명령이 전달되고, 이때의 슬레이브 제어기의 피드백이 다시 마스터 장치에 전달되어 사용자가 마스터 장치를 통해 힘 또는 토크를 느끼는 힘/토크 반향 시스템이다. 물리적으로는 마스터와 슬레이브가 연결되지 않기 때문에 양쪽 독립 시스템이 임피던스 형태의 정보 교환을 통해 원격 사용자가 실재감을 느끼는 구조로 시간 지연에 의한 제어기의 안정성 문제가 유발되는 분야이다.

마스터와 슬레이브가 양방향으로 연결되는 경우는 슬레이브에서 받은 환경 정보를 마스터에 피드백하기 때문에 시간 지연은 매우 중요한 요소이다. 예를 들어, 스트리밍 서비스를 이용하는 경우, 네트워크 문제로 출력이 지연되어 좀 더 뒤쪽의 영상을 보려 한다고 가정하자. 슬레이브에 해당하는 스트리밍 서버의 늦은 전송 때문에 사용자와 서버 간의 영상물 위

치에 대한 반복적인 불일치가 생겨 전혀 다른 위치의 영상이 전송되는 경우가 발생한다. 이러한 마스터-슬레이브는 수술용 로봇, 원자로 로봇, 우주 정거장 등에 활용되기 때문에 통신 지연에 의한 사고 발생이 큰 문제가 될 수 있다.

2.4 타이머와 스레드

로봇 시스템을 구성하는 경우, 제어, 명령 처리, 출력을 위해 반복 루틴이 필수적으로 필요하게 된다. 이러한 반복 루틴의 처리를 위해 크게 타이머(Timer)와 스레드(Thread)로 구별되는 두 가지 방식이 있다. 먼저 스레드에 대한 이해가 필요하다.

컴퓨터 프로그램의 경우, 크게 자원 활용의 측면에서 프로세스와 스레드로 나뉜다. 프로세스는 OS로부터 자원을 독립적으로 할당받아 CPU, 메모리, 디스크를 점유하고 있다. 모든 프로세스는 최소한 한 개 이상의 반복 구조인 스레드를 갖게 되며 프로세스가 여러 개의 스레드를 갖는 경우를 다중 스레드라고 한다.

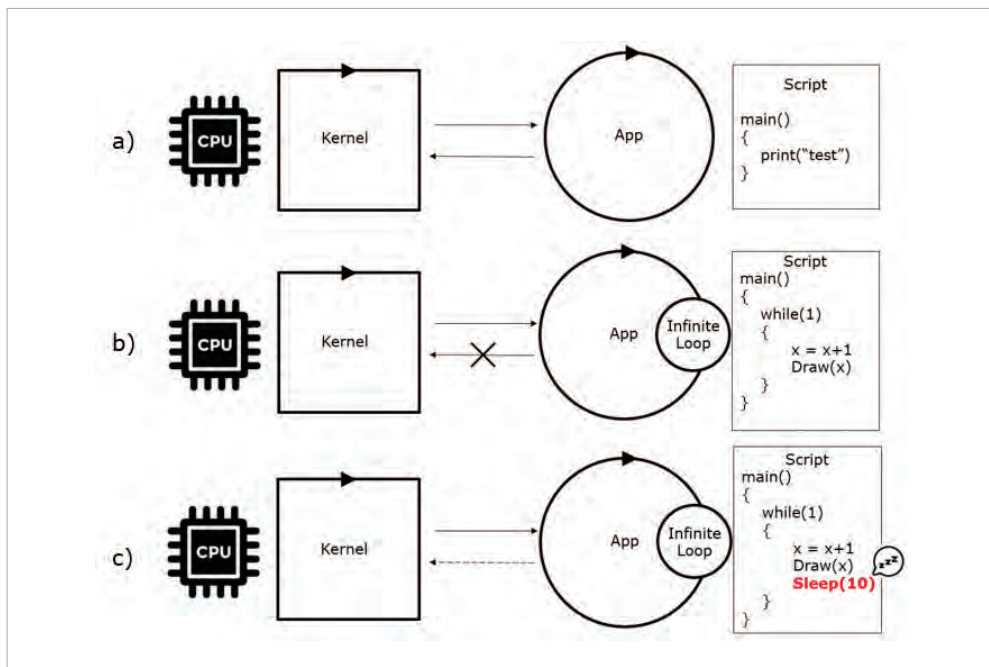


그림 13-6 커널은 스레드에 프로세스 점유율을 배치함

그림처럼 스레드는 특정 코드의 동작에 대한 허가를 커널로부터 얻게 된다. a)의 경우는 코드가 한번 실행하고 종료되어 커널로 반환되는 경우이며, b)의 경우는 코드 내부에 무한 루틴이 있어 커널로의 반환 없이 반복을 계속하는 과정이다.

코드의 실행에 대해 엄밀히 말하면, 커널은 다수 스레드 상의 코드를 일부 수행하고 다른 스레드로 옮길 수 있다. 스레드가 가진 기계어 코드를 일부만 실행하고 다음 스레드의 코드를 일부 실행하는 식으로 다수 스레드의 코드 실행을 저수준에서 조절하는 기능이 있다. 스레드 간 우선순위를 부여하여, 스레드 동작이 반환되지 않더라도 커널이 멈추지 않도록 한다. 이러한 기능을 멀티 프로세싱이라 한다.

예를 들어, 커널은 프로세스 점유율 100%를 가지고 있다고 하자. a)처럼 간단한 코드를 실행할 때에 10% 점유를 할당하고, 커널 자신의 실행을 위해 90%를 가질 수 있다. 하지만 b)의 경우에는 스레드의 무한 루프 때문에 반대로 90%를 스레드에 할당하고 커널은 10%의 시간을 할당하여 전체 시스템이 느리게 동작하는 것이다.

이처럼 커널이 스레드의 동작 부여 및 반환에 기여하는 성격과 스레드 상의 기계어 코드를 분할하는 기능에 의해 c)와 같은 독특한 기능의 구현이 가능하다. c)는 b)와 마찬가지로 스레드 안에 무한 루프가 포함되어 있다. b)가 내부의 무한 루틴 때문에 프로세스 점유율의 대부분을 차지하고 있는 상황으로, 이러한 경우 커널의 동작이 느려져 OS에서는 화면이 제대로 나타나지 않는 일도 발생한다.

c)가 가진 독특한 특징은 Sleep 기능을 이용하여 잠시 대기하도록 하는 것이다. 인자 10은 10ms 동안의 대기를 의미한다. c)의 스레드는 무한 루프를 가지고 있지만, 반복적으로 sleep 명령을 호출하므로 프로세스 점유율을 줄이게 되어, 커널은 스레드를 30~40%의 낮은 비율로 동작시키고 자기 자신은 60~70%의 높은 프로세스 점유율을 가지게 된다.

스레드 루틴을 무한 루프만으로 구성하면, 프로세스 점유율이 높아져 전체 프로세스가 100%에 가깝게 동작하고 이에 의한 발열이 심해지는 현상이 발생한다. 하지만 무한 루프 안에 sleep 또는 OnIdle과 같은 대기 명령을 사용하면 프로세스 점유율이 대폭 떨어지게 된다. 그러나 이러한 대기 명령을 사용하면 스레드의 단위 시간당 반복 횟수가 떨어지게 된다. 따라서 스레드를 이용하여 반복할 루틴이 초당 몇 Hz로 필요한지를 먼저 테스트하고 이에 맞춰 sleep 문을 적용하는 것이 바람직하다.

이러한 스레드 방식은 각 스레드의 코드 일부를 나누어서 돌아가며 실행하기 때문에 보다 정교화된 방식으로 OS 구조를 재설계할 수 있다. 바로 이벤트 기반 방식이다. 스레드 상의 코드를 분할하여 동작하는 저수준 방식과 달리 상위 수준에서 문제를 다시 생각해 볼 수 있다. 저수준의 코드를 분할하는 것보다 다양한 기능을 분류하고 해당 기능이 필요할 때마다 호출되게 하는 것이 이해하기 편리하다. 이를 이벤트 방식이라 부른다. 프로그래밍의 기본인 입출력을 토대로 이벤트 방식을 이해해보자. 다음의 의사코드(Pseudocode)는 키보드 입력을 받아 오른쪽으로 개체를 이동하는 경우이다.

```
main()
{
    x=0
    while(1)
    {
        key=getch()
        if key is right:
            x=x+1
            Draw(x)
    }
}
```

입력인 getch()와 화면에 그림을 그리는 Draw(x)로 구성된다. 이러한 전통적인 코드를 이벤트 기반으로 바꾸게 되면, 입력을 처리하는 onKey, 화면에 그림을 그리는 onDraw 등으로 구별할 수 있다. 이벤트는 컴퓨터 상의 기능을 각각 유형으로 분류하는 것으로, 입력을 처리하는 키보드 루틴, 출력을 처리하는 화면 구성 기능이 서로 분리되어 있는 것이 특징이다. 이를 스레드 상에서 구현하면 다음과 같은 이벤트 기반 프로그램이 작성된다.

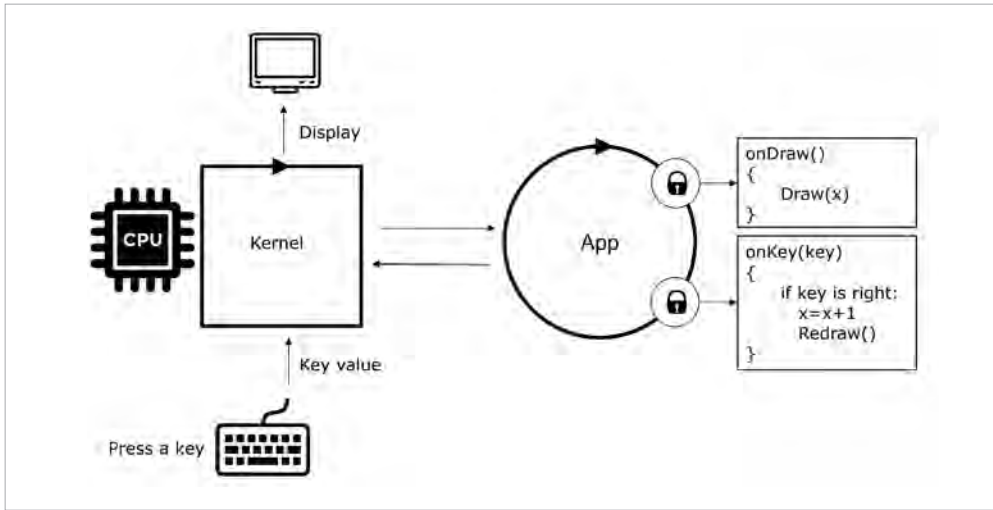


그림 13-7 입출력의 이벤트 기반 프로그래밍

입출력은 하드웨어를 통해 이루어지기 때문에, 키보드의 입력과 디스플레이의 출력은 모두 커널에서 처리된다고 하자.

1. 사용자의 키보드 입력은 커널에 입력되고, 커널은 현재의 앱이 실행될 때 키보드 입력이 있음을 해당 스레드에게 알려준다.
2. 이처럼 전달된 명령은 현재 스레드가 동작할 때 onKeyDown 함수의 자물쇠를 풀어주고, onKeyDown 함수의 내부가 동작한다.
3. onKeyDown 함수는 키보드 값을 입력받았지만, 입력 전용 함수이기 때문에 그림을 그릴 수가 없다. 그림을 그리기 위해서는 onDraw가 호출되어야 하기 때문에 Redraw 명령을 이용하여 커널에 그림을 업데이트하라고 명령을 전달한다. 그리고는 풀린 onKeyDown 자물쇠를 잠근다.
4. 커널로 프로세스가 반환되면, 커널은 새로운 처리 과정인 그림의 갱신을 수행하게 된다. 커널이 현재의 앱 스레드에 접근하게 되면 onDraw의 자물쇠가 풀리고 onDraw 함수가 호출된다. onDraw가 호출되고 나면 자물쇠를 다시 잠근다.
5. 스레드는 onDraw 다음 동작인 onKeyDown를 처리하려 하지만 자물쇠가 3번에서 잠겨져 있기 때문에 그대로 지나치게 된다.

이처럼 이벤트 기반 시스템에서는 프로그램의 순서가 일반적인 스크립트와 다르다. 커널과 스레드에 명령을 전달하고, 현재 순서가 아닌 다음번에 명령이 진행되는 것이 특징이다. 하지만 CPU 속도가 고속이기 때문에 사용자의 경우, 키보드를 누르자마자 화면이 변경되는

것처럼 느끼게 된다. 이처럼 커널을 통해 이벤트 활성화를 시키는 명령을 메시지라 한다. 메시지를 커널에 보내면, 해당 스레드의 다음 턴에서 처리되기 때문에 다소 시간 지연이 있다.

이처럼 스레드를 이용한 이벤트 처리 과정을 고려하면, 반복적인 자동 이벤트 발생이 가능하다. 이를 타이머 기능이라 부른다.

```
main()
{
    x=0
    y=0
    while(1)
    {
        y=y+1
        Draw(y)

        key=getch()
        if key is right:
            x=x+1
            Draw(x)
    }
}
```

앞의 의사 코드는 키보드 입력이 없더라도 무한 루프 While에 의해 y 값이 계속 증가하며, 화면에 Draw(y)를 통해 그림을 그릴 수 있다. 앞선 이벤트 예제는 키보드 입력 또는 Redraw에 의한 이벤트 발생이 프로그램 내에서 이루어졌으나, 이처럼 y 값이 계속 증가하기 위해서는 이벤트가 계속 주기적으로 발생하여야 한다. 이러한 이벤트를 타이머 기능이라 부르며, 모든 유형의 이벤트 기반 프로그래밍은 타이머 이벤트를 포함하고 있다. 다음 그림을 보면, 커널에 의해 주기적으로 타이머 이벤트가 호출되고 있다.

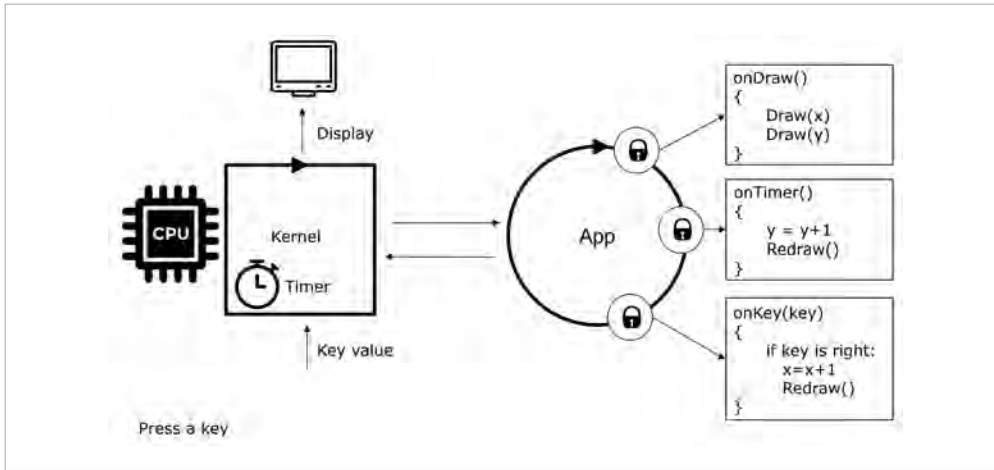


그림 13-8 타이머 이벤트

그림 13-8의 경우, 커널에 정해진 시간 간격으로 타이머 이벤트를 호출하도록 설정해놓으면, 커널은 시간에 맞춰 타이머 이벤트인 `onTimer`를 호출하도록 명령을 보내고 자물쇠를 풀어놓는다. 그러면 앱 내 스레드가 실행되다가 `onTimer` 루틴을 실행하고 끝난 뒤 다시 자물쇠를 잠근다. 주의할 점은 `x` 값이 변동되는 키보드 입력이 발생할 때나, `y` 값이 변동되는 타이머 이벤트 발생 시에 화면 업데이트를 위한 `Redraw`가 호출된다는 것이다.

이러한 타이머 이벤트와 달리 스레드 자체를 활용하면 어떻게?

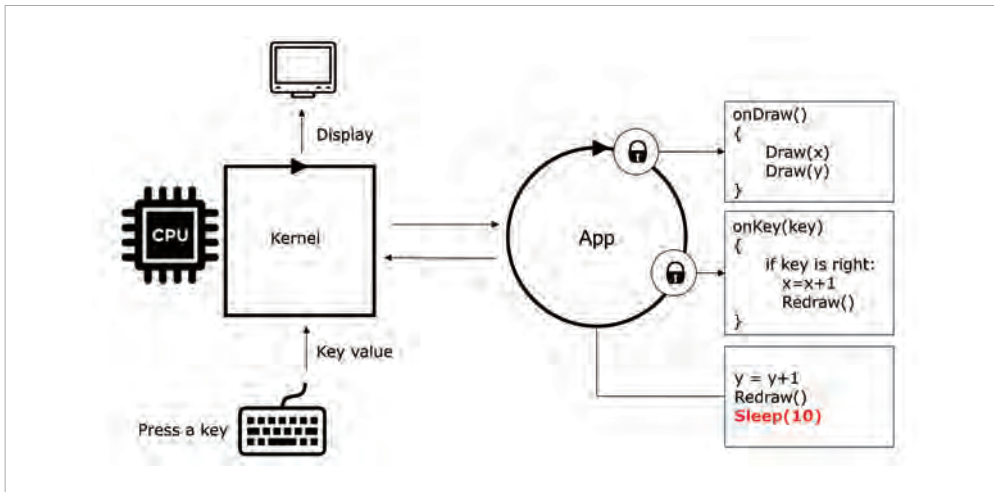


그림 13-9 스레드에 의한 반복 실행문

그림 13-9의 경우, c) 타입의 스레드 기능을 이용하여 커널의 타이머 명령 없이 스레드만의 반복 루틴을 활용하여 동일한 반복 기능 구현이 가능하다. 일반적으로 타이머 명령은 커널의 점유율 변화 때문에 속도가 느린 편이다. 하지만 스레드를 이용하면 Sleep 양을 조절함에 따라 매우 빠르게 반복 동작하는 루틴을 구성할 수 있다. 이러한 성격을 이용하여 PC 기반의 컨트롤러를 구성할 때 스레드를 활용한다.

다음 그림 13-10은 인코더의 각도를 읽어 모터를 제어하는 경우이다. 제어기 루틴을 PC에서 담당하며, 각각 타이머와 스레드를 이용하여 제어를 할 때의 사례이다. 타이머에 비해 스레드의 속도가 약 30~100배 정도 빠르기 때문에, 목표값 주변에서 D 제어에 의한 잔류 진동의 영향력이 확연히 비교된다. 목표값으로 이동 중인 천이 과정에서 그래프를 확대해 보면, 오른쪽 그림처럼 계단 형태의 데이터가 확인된다. 이는 인코더 정보를 읽어들이는 부분이 스레드 제어 주기보다 낮기 때문에 발생하는 현상이다.

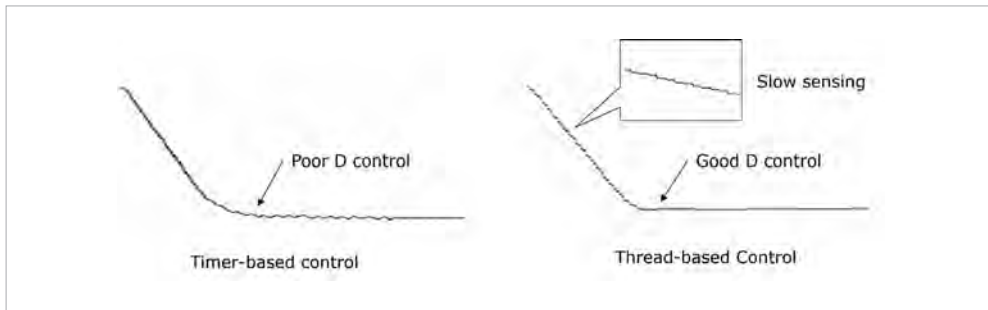


그림 13-10 타이머 vs. 스레드 기반 제어 사례

스레드를 이용하여 직접 반복 루틴을 만드는 것은 PC에서 구현할 수 있는 가장 빠른 제어 루틴에 해당한다. 이때, 너무 높은 제어 주기를 사용하면 센서 정보를 읽는 과정보다 제어기 속도가 더 빠르기 때문에 계단 현상이 나타난다. 이때는 sleep의 대기 시간을 늘리거나, 센서의 읽는 속도 향상이 필요하다. 스레드를 쓰면 제어 주기가 빨라지기 때문에 제어 성능에 유리하지만, 센서를 읽거나 구동기에 명령을 보내는 인터페이스 속도가 확보되어야 한다.

PC를 제어기로 사용하는 경우, 전용 인터페이스 보드를 사용하거나 RS232, RS485, CAN 통신을 USB로 전환하는 것이 일반적이다. 이때, 전용 인터페이스 보드의 경우는 속도 저하가 적은 반면, 기존 통신 방식을 USB로 전환하는 과정에서 속도 저하가 많이 발생한다.

CAN 통신이더라도 연결되는 슬레이브가 많아질수록 PC에서 USB를 통한 통신이 저하되기 때문에 고속의 전용 보드를 사용하는 것이 유리하다. 고가의 제어 전용 보드라 할지라도, USB를 쓰는 경우 다축 제어 시에 100Hz 미만의 느린 제어 주기를 가지게 되므로 조심해야 한다.

2.5 시스템 부하의 분배

로봇 시스템의 전체 구조를 결정할 때에 많은 실수와 시행착오를 겪는 부분이 부하(load)의 분배이다. 로봇은 다수의 관절을 갖기 때문에 각각의 관절 구동기와 유기적 연동 및 동기화가 매우 중요하다. 이 외에도 각 관절의 고속 제어 성능 확보와 함께 다수 관절의 Jacobian 행렬을 풀거나 경로 생성, 외부 영상 장치와의 연동 등 시간이 소요되는 기능이 많은 복잡한 시스템이다. 단계적 접근을 통해 어떻게 문제를 해결할지 논해 보자.

2.5.1 PC 기반의 제어 vs. 관절의 독립 제어

논의할 여지가 없이, 로봇의 자유도가 많고 관절이 다양할수록, 로봇의 제어기는 독립적(Individual control)으로 구성하는 것이 필수적이다. 각 관절에 각도 제어를 위한 HW 기반의 제어기를 구성하고, 이를 중앙제어기에서 통합 관리하는 것이 유리하다.

Maxon 또는 NI 사의 경우, 자사의 전용 인터페이스 장치를 판매하고 있으며 이를 활용하여 PC에 인터페이스하고 PC 기반의 제어를 하는 경우가 많다. 보통 개발 편의성을 위해 이러한 구성을 사용하지만 곧바로 다른 어려움에 부딪히게 된다.

이러한 제어기 구성 문제는 결국 실제 제어를 수행할 제어기가 어느 장치에 있어야 하는가? 라는 문제로 변경할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, PD 제어기는 D 제어 품질을 위해 고속화 또는 RT에 가까운 성능이 필요하다. 전용 인터페이스를 이용하더라도, PC에서 제어기를 꾸미게 되면 앞선 문제점들, 스레드를 이용한 고속화 및 제어 주기의 균일화, 센서 및 구동기의 고속 인터페이스에 대한 어려움이 있다. 최근 EtherCAT 장치가 고속화됨에 따라 마스터를 이용한 PC 기반 제어가 다시 부각되고 있으나, 고성능의 제어 품질을 얻는 데는 여전히 한계가 있다.

기존의 전용 인터페이스 장치에는 아쉽게도 사용자가 원하는 제어기를 넣기 어렵다. PD를 대신하여 강인제어기를 구성하여 코드로 입력하는 기능이 지원되는 장치는 DSP 보드를

제외하고는 없다고 볼 수 있다. 대신 이러한 전용 장치는 PD 제어를 이미 내장하고, Gain 튜닝이 가능한 API를 지원한다.

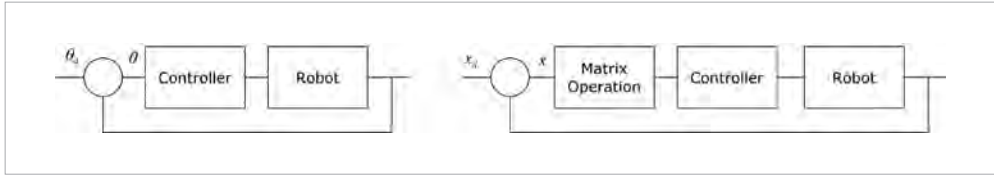
많은 로봇 관련 연구실의 잘못된 관습 중 하나는 PC를 이용한 중앙제어를 선호하기에, 전용 장치가 가진 PD 제어를 활용하지 않는 것이다. 다른 제어기가 아닌 PD 제어를 사용할 계획이라면, 그리고 전용 장치가 PD 제어를 가지고 있다면, 그 어떤 PC기반 제어기보다 전용 장치 내의 PD 제어기의 제어 성능이 우수할 수 있다. 전용 장치에서는 HW 보드 기반의 실시간성에 가까운 제어가 가능하기 때문에, PD 제어기만 활용할 계획이라면 전용 장치의 PD 제어기 기능을 사용하는 것이 제어 성능을 높이는 데 도움이 된다.

고가의 전용 장치를 사용하지 않거나, PD 제어 외의 제어기 구성을 고려한다면 마이크로 프로세서를 이용하여 UDP 네트워크 또는 CAN 통신으로 전체 제어를 구성하는 것이 바람직하다. ARM 기반 보드에서 UDP 통신을 사용하는 경우, 최대 초당 15,000회의 양방향 통신이 가능하여 어떠한 제어기보다 우수한 성능 도출이 가능하다. 최근 ST 보드의 이더넷 통신의 경우 초당 1,000회의 양방향 통신이 가능하다.

2.5.2 경로 설계 및 Jacobian 관련 행렬 연산의 위치

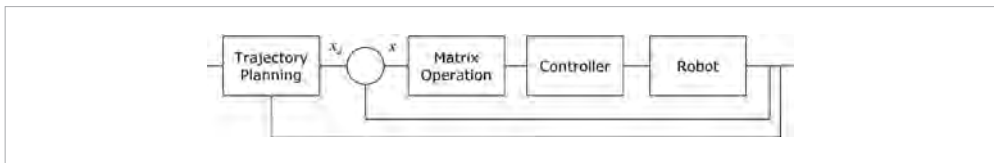
로봇에서 제어는 경로의 생성을 위한 연산과, 행렬 연산과 함께 제어기의 위치를 결정하는 것이 바람직하다. 행렬 연산의 경우, 힘 반향을 위한 Jacobian Transpose, 수치 역기구학, 여유 자유도, Cartesian space(직교 좌표계) 제어 등 다양한 곳에 사용되며 제어기 속도에 비해 많은 연산량이 필요하다. 이러한 기능이 요구되기 때문에 PC 기반 제어를 선호하게 되는데, 연산의 성질과 제어 성능을 고려한 올바른 선택이 중요한 부분이다.

다음 그림을 고려해보자. 좌측은 관절각 제어기, 우측은 Cartesian 공간 제어의 형태를 갖는다. 행렬 연산은 Jacobian 행렬의 역행렬과 곱 연산으로 구성되는데, 역행렬을 빠른 속도로 처리하는 데에는 한계가 있다. 우측처럼 행렬 연산이 제어기 안에 들어가는 것은 좋은 시스템 구성이 아니며, 특히 올바른 로봇 제어와도 무관하다. 경로의 생성과 추종 없이, 관절을 각도 제어 형태로 움직이는 것은 로봇이라 보기 어렵다. 작은 로봇이라 하더라도 경로 추종이 필수적이다.



로봇 제어기의 경우, 관성, 전향력, 중력의 영향을 많이 받기 때문에 경로 설계에 이은 추종이 제어 품질을 향상할 수 있다. 이러한 비선형적인 관절의 토크 변화는 제어기에 높은 Gain을 필요로 하며 이에 따라 D 제어의 효율이 매우 중요하게 된다.

따라서, 다음 그림과 같이 경로 추종을 하는 구성을 고려해보자. 경로 설계에 따라 제어기에 주어진 입력을 행렬 연산을 거쳐 제어기가 처리하고 있다. 경로가 주어지기 때문에 앞선 예제와 달리 제어기의 부하가 다소 낮아지며 과도한 Gain 값을 피할 수 있는 장점이 있다. 하지만 역행렬 연산이 제어기 안에 들어가 있어 전체 제어 주기는 낮아질 수밖에 없다.



마지막으로 다음 그림을 고려해 보자. 제어기와 행렬 연산이 왼쪽으로 빠져 있으며, 제어기는 각도만을 추종하는 형태로 동작한다. 주어진 각도를 제어기가 고속으로 추종할 수 있어 제어 품질이 향상된다. 또한 주어진 복잡한 문제, 역행렬, 역기구학 등 연산량이 필요한 작업을 미리 수행하고 이를 경로로 설계해서 제어기는 단순히 각도만 추종하도록 변경한 사례이다.

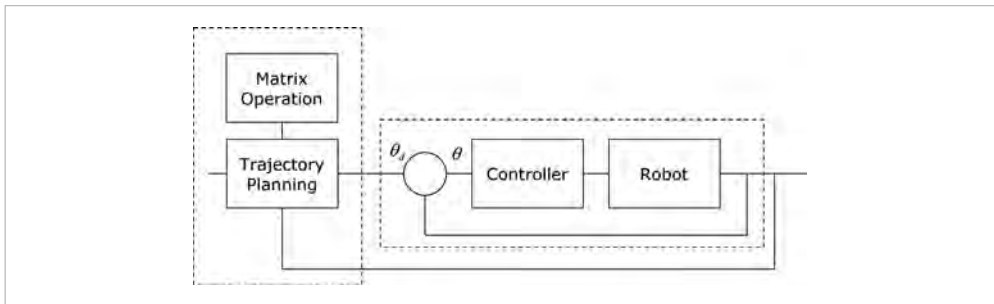


그림 13-11 연산량에 기반하여 PC 및 로컬 제어기에 분배한 사례

마지막 그림의 경우처럼, 제어기는 각도 제어만 수행하고, 로봇 공학의 복잡한 문제는 미리 처리한 후 경로 추종만을 적용하는 방식이 실제 로봇에서 사용하는 제어기 구성도라 할 수 있다. 이처럼 문제를 분리하면, 제어기는 로컬 제어기만으로도 좋은 품질을 얻을 수 있으며 많은 연산이 필요한 부분만 PC에서 처리하는 것이 가능하다.

특히 역행렬 연산의 경우, 로컬 제어기에서 처리하기 어려우며 다음 절에서 소개할 행렬 연산 기능의 영향을 받는다. 제어기의 플랫폼이 고속의 행렬 연산 처리가 가능하더라도, 제어기 안에 행렬 연산을 집어넣지 않아야 제어 주기의 실시간성에 영향을 주지 않게 된다.

2.5.3 행렬 연산

로봇 제어에서는 행렬 연산을 빼놓을 수가 없다. 역행렬 계산을 위해 고속의 SVD 기능이 가능한가라는 질문과 동일하다. 이에 대한 답변은, Basic Linear Algebra Subprograms(BLAS) 라이브러리의 활용 여부를 의미한다. 필자의 경우, 정교한 SVD 루틴을 확보하는 것에 오랜 시간을 소비하였는데, 전 세계 모든 사람이 바로 이 BLAS를 사용하고 있다.

Intel 칩에서의 수치 연산 속도 최적화 라이브러리인 Intel Math Kernel(MK)이 있다. 실제 MK의 내부 코드 또한 행렬 연산에 대해서는 BLAS로 구성되어 있다. 이 BLAS는 60년대 후반의 수치 해석 논문에 기반하여 1979년부터 제공되고 있다. 수치 오류가 적은 Fortran 코드로 작성되어 있으며, C로 만든 것은 CBLAS로 불린다. BLAS의 경우 여러 패키지로 나뉘는데, 많이 사용되는 것 중 하나가 LAPACK, LINPACK, EISPACK 등이다. 테네시 주립대, 오크리지 연구소를 중심으로 수치 문제를 해결하기 위해 만들어진 전용 라이브러리이다.

대형 행렬의 곱하기 연산을 직접 작성하여 BLAS 라이브러리와 비교하면 대략 100배 이상의 차이를 보인다. 특히 역행렬의 기본인 SVD 루틴의 경우, 피봇 문제 해결과 관련하여 압도적인 우수성을 보여준다. 매트랩, 옥타브, NumPy가 모두 BLAS로 구성되어 있다. 빠른 처리 속도가 필요한 로봇 제어에서는 이러한 BLAS 기반 행렬 루틴의 사용이 매우 중요하다.

BLAS의 경우, 포트란, C 버전과 함께 Windows, Linux, Mac OS 버전이 배포되고 있으며, 또한 iOS, Android용 프레임워크가 배포되고 있어 대부분의 상용 OS에서 사용할 수 있다. 하지만 마이크로프로세서를 사용한다면 BLAS의 사용이 불가능하며 이에 따라 역행

렬 루틴을 제어기 내부에서 구현할 수 없다. 따라서, 역행렬과 관련되는 수치적 역기구학, Jacobian 역행렬 기능은 PC 또는 중앙제어 단말에서 처리하고, 제어기는 각도 제어 위주로 로컬 컨트롤러에서 구성하는 것이 올바른 사례이다.

3. 통신과 스레드

본 절에서는 HW와 SW 간의 연결을 위한 기법 중 스레드 관리에 대한 부분을 다루어 보고자 한다. HW와 SW를 연결하는 통신 방법은 다양하나, RS232, RS485, CAN, 블루투스, 이더넷(Ethernet), 이더캐트(EtherCAT)이 대부분이다. 이러한 통신 중 대표적인 경우의 스레드 처리에 대해 다루어 보고자 한다.

통신의 특성을 이해하기 위해 다음 몇 가지 근본적 질문에 대해 생각해보자.

- 상대 에이전트로부터 언제 데이터가 전송되는가?
- 데이터는 연속적으로 전송되는가?
- 양쪽 에이전트의 CPU 속도가 다르면 어떻게 되는가?

첫 번째 질문에 대한 답은 언제 데이터가 전송될지 전혀 예상이 불가능하다는 것이다. 마치 탑승자를 기다리고 있는 엘리베이터처럼 언제 이동 명령이 전송될지 알 수가 없다. 두 번째 질문은 온라인 게임, 모바일 통신의 경험을 토대로 예상할 수 있다. 연속적으로 보내고 싶지만, 중간에 시간 지연도 생기고 일부는 데이터가 손상되는 경우가 발생한다. 따라서 얼마나 연결을 대기할지, 데이터 손상 여부를 어떻게 파악할지 사실 알 수가 없다. 마지막 답변은 두 번째 질문과도 유사하다. 통신 에이전트 간 속도 차이가 커질수록 데이터 끊김과 손상이 발생할 가능성이 커진다.

하지만 우리가 사용하는 다양한 통신 기반 응용프로그램에서는 완벽하진 않지만 어느 정도의 네트워크 환경이 유지된다. 이러한 통신 유지를 위해 프로토콜 설계와 통신의 타이밍 다이어그램 방식을 알아본다.

3.1 바이너리 데이터 vs. 텍스트 데이터

텍스트 데이터는 일반적으로 사용하는 문자코드를 이용한 데이터를 말하며, 바이너리 데이터는 기존 10진법 기반 데이터를 16진법으로 표현하는 것을 말한다. 다음 C 코드를 살펴보자.

WORD	a = 100;				
WORD	b = 1000;				
WORD	c = 100000;				
DWORD	d = 1000000;				
BYTE buf[4]={0,};		Buffer[0]~[3]			
memmove(buf, &a, 2);		0x64	0	0	100=0x64
memmove(buf, &b, 2);		0xE8	0x03	0	1000=0xE8+ 0x03*256
memmove(buf, &c, 2);		0xA0	0x86	0	1000000=0xA0+0x86*256 ?
memmove(buf, &d, 4);		0xA0	0xE6	0x01	1000000=0xA0+0x86*256 + 0x01*256*256

WORD는 2byte로 구성되는 변수이다. 첫 번째 1byte는 0~255를 의미하고, 두 번째 1byte는 256단위의 올림에 의해 256이 곱해져 나아가는 방식이다. 그러므로 WORD의 최소값은 0, 최대는 $256 \times 256 - 1$ 인 65535에 해당한다. 이처럼 16진수로 숫자를 표기하면 10진수보다 데이터 공간을 절약할 수 있다. 255는 텍스트로는 3자리이지만, 바이너리 데이터로는 0xFF, 즉 1바이트만 차지한다. 텍스트 데이터는 직관적으로 보기 편하지만 자릿수가 증가하기 때문에 어지간한 정보라면 바이너리로 표현하는 것이 편하다.

따라서, WORD a가 100이면 0~255 사이에 값이 존재하여 버퍼, buf에 옮기게 되면 16진수로 0x64에 해당한다. 바이트 버퍼인 buf에 데이터를 옮길 때에는 memmove 함수를 사용하여 a 주소에 있는 값을 2개만큼만 buf에 옮긴 예이다.

값이 1000인 b의 경우는, $0xE8 + 0x03 \times 256$ 으로 구성된다. 이는 $232 + 3 \times 256$ 으로 표현된 것이다. 값이 100000인 c는 몇 바이트가 필요할까? 2바이트의 최대값이 $256 \times 256 - 1$ 이므로, 2바이트로는 정확한 값을 표현할 수 없다. 따라서 c의 예시를 보면, 0xA0, 0x86으로 구성되어 값은 $160 + 134 \times 256 = 34464$ 로 잘못 표기된다. 100000은 최소 3바이트가 필요하므로, d의

경우 DWORD(double word)인 4바이트로 표기한다. 따라서 바이너리 데이터는 0xA0, 0x86, 0x01로써 $160+134*256+1*256*256$ 으로 표기된 것이다.

이처럼 숫자의 경우, 텍스트와 바이너리로 표현하는 방식에서 텍스트는 직관적 이해가 좋지만 많은 공간을 차지하므로, 16진수를 이용하여 바이트 단위로 표현하는 것이 바이너리 표현이다. 바이너리 데이터로 표기할 때 1바이트는 256개의 숫자인 0~255, 2바이트는 256개의 제곱인 0~65535, 3바이트는 0~16842751, 4바이트는 0~4311744511까지 표현할 수 있다. 4바이트의 최댓값은 약 4.3G에 해당한다.

OS가 32bit인 경우, 선행 메모리 주소를 4byte로 표현하는 것이기 때문에 최대 다를 수 있는 메모리가 4G에 해당한다. 예전 32bit OS의 경우, 메모리 증설이 4G였던 것은 이러한 이유 때문이다.

텍스트와 바이너리 데이터는 사용처에 따라 선호도가 달라진다. 명확한 규칙이 필요한 경우는 바이트 단위로 크기를 끊기 위해 바이너리 데이터가 선호된다. 많은 통신 프로토콜은 바이너리 형태의 데이터를 전송하고, 내부 데이터 영역에는 유형에 따라 텍스트, 바이너리 형태를 적용한다.

이러한 바이너리 데이터의 문제점 중 하나는 엔디언(Endian) 문제이다. 프로그램 언어에 따라 숫자를 표현하는 방식이 다르다. 앞의 예제에서는 첫 번째 자리가 작고, 두 번째 자리가 커지는 방식이다. 이를 Little Endian이라 한다. 반대로 첫 자리가 가장 크고 다음 자리가 작아지는 경우를 Big Endian이라 한다.



Little Endian은 많은 컴퓨터 언어에서 사용된다. C/C++, Python은 Little Endian을 사용하지만, JAVA의 경우 Big Endian을 사용한다. 따라서 바이너리 데이터를 사용할 경우 가장 대표적인 문제가 C와 JAVA 간의 바이너리 데이터 전송 문제이다. 4byte 정보를 전송할 때

JAVA가 보낸 숫자 1은 C에서는 256*256*256으로 인식된다.

언어 유형과 달리 OS와 CPU에 따라서도 Endian 문제가 발생한다. X86 기반 시스템은 대체로 Little Endian을 사용하지만 예전 Power PC를 사용하던 Max OSX는 Big Endian을 사용하였다. 소형 NAS에 사용되던 MIPS 기반 Linux나 SPARC 기반 Solaris도 Big Endian을 사용한다. 따라서, 서로 다른 언어, OS로 통신할 때에는 이러한 Endian 문제를 반드시 고려해야 한다.

3.2 프로토콜 설계

불특정 시기에 데이터가 전송되고 에이전트 간 속도가 다르기 때문에, 많은 데이터가 전송될 때 반드시 확인해야 하는 것은 데이터의 올바른 시작과 끝을 찾는 것이다. 이를 위해 통신 기법에서는 다양한 프로토콜을 사용한다. 프로토콜은 제조사, 협회 등에서 결정하기도 하지만 사용자가 직접 작성하는 사례도 많다. HTTP, TCP/IP, UDP는 대표적인 표준 프로토콜이다.

TCP/IP는 네트워크 연결을 위한 기본 프로토콜로 구성되어 접속 시 저수준에서 사용자와 무관하게 통신 에이전트 간 사전 작업을 진행한다. A가 B에게 무언가를 요청하고, B는 A에게 결과를 전송한다. 다시 필요한 무언가를 A가 B에게 요청하고 B는 응답한다.

이렇게 주고받는 과정을 타이밍 다이어그램이라 한다. 필요한 과정이 종료되면, 이제 사용자가 원하는 데이터의 전송이 이루어진다. UDP의 경우는 TCP/IP에 비해 에이전트 간 타이밍 다이어그램에 의한 절차가 거의 없다. 대신 사용자가 알아서 직접 타이밍 다이어그램에 해당하는 절차를 완성해야 한다.

이런 특성 때문에 데이터 전송 시에 TCP/IP는 느리지만 전송 품질이 좋고, UDP는 빠르지만 전송 품질이 다소 떨어진다. 속도 차이는 과연 얼마나 날까? 데이터 크기에 따라 다르겠지만, 예전에 스트리밍 서버를 만든 경우에 속도 차이가 최소 50에서 100배 정도 차이가 났다. 따라서 TCP/IP와 UDP를 구별하여 사용하는 것이 적절하다. 예를 들어 메신저 프로그램의 경우, 웹 서버를 통해 사용자가 접속하면 상대방을 선택, 대화를 시작할 때까지는 TCP/IP를 사용하고, 텍스트, 음성, 사진 데이터를 교환할 때에는 UDP를 사용한다. 많은 통신 프로그램의 경우, 한 개의 포트만으로 구성하지 않고 필요에 따라 많은 포트와 다수의 서

버, 클라이언트 관계를 유지하며 통신을 처리한다.

불특정 시기에 전송되는 데이터의 시작과 끝을 어떻게 확인할 수 있을까? 데이터 전송은 확률을 고려해야 한다. 시작을 찾는 가장 쉬운 방법은 아무런 변화가 없다가 첫 번째 전송이 시작되는 경우이다. 하지만 이러한 방식은 중간에 시간 지연이 발생하거나 데이터를 받는 쪽 CPU가 느려서 입력된 데이터를 제때 처리하지 못하면 시작을 찾을 수 없다. 따라서, 시작을 찾기 편하도록 항상 특정한 시그널을 포함하게 되는데, 이를 헤더(Header)라 부른다. 전송하고자 하는 데이터는 그림 13-12처럼 앞부분에 헤더를 붙이고 뒷부분에 데이터를 붙여서 전송한다.

그림처럼 데이터는 버퍼에 연속적으로 저장된다. 시간 지연에 의해 데이터가 중간에 사라지면 그다음 데이터가 버퍼에 연속 저장된다. 사라진 데이터를 알 수 있는 방법은 없다. 연속적 데이터에서 시작 부분을 찾으려면 특정 시그널, 키워드를 사용한다. 그림에서는 NET라는 글자를 시작점으로 처리하여 프로토콜의 앞부분 헤더의 시작으로 사용하고자 한다. 또한 헤더에 이어서 전송될 데이터의 크기, 유형에 대한 정보를 담을 수 있다. NET 글자 뒤에 한 바이트는 데이터의 크기를 넣는 식이다. 만약 데이터가 255byte를 넘어가는 크기라면, NET 글자 뒤에 두 바이트를 사용하여 256의 제곱인 0~65535 크기를 처리할 수 있다.

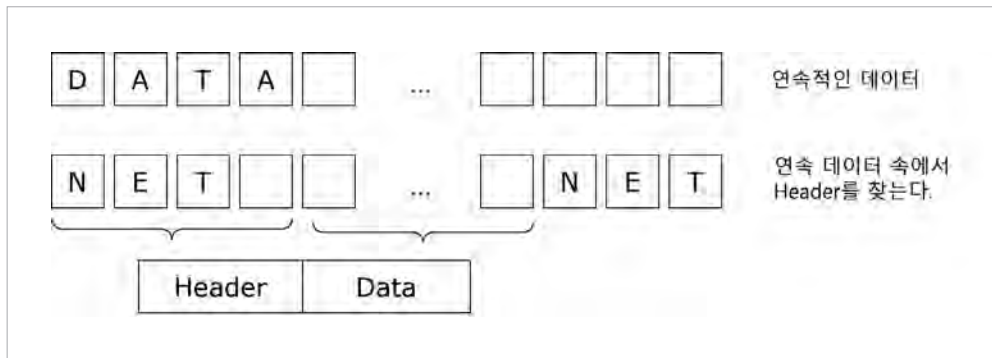


그림 13-12 통신 데이터와 프로토콜

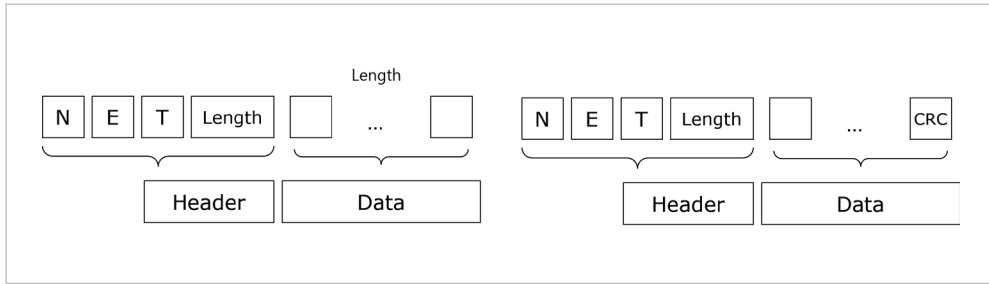


그림 13-13 데이터 크기 정보의 추가 및 CRC 사례

여기서 한 가지 의문이 발생한다. 만약 데이터 부분이 NET라는 글자를 포함하면 어떻게 될까? 무엇이 데이터이고 무엇이 헤더인지 완벽히 알 수 있을까? 이 문제 역시 확률적으로 해결할 수 있다. 물론 데이터 내에 NET라는 글자가 들어가지 않으면 가장 좋지만, 포함될 수도 있다면 헤더의 NET와 같은 시그널 표식 길이를 점점 길게 하면 데이터와 겹칠 가능성이 점점 낮아진다. 하지만 헤더의 크기가 증가하여 전송량이 증가하기 때문에 좀 더 다른 방법을 고려해 볼 수 있다.

3.3 CRC 설계

보통 CRC라고 불리는 Cyclic Redundancy Check는 데이터의 무결성(Integrity)을 확보하고자 하는 확률적 방법론이다. 헤더와 데이터로 구성된 정보가 반복적으로 전송될 때 시작과 끝을 구분하기 위해 CRC를 사용한다. 간단히 CRC는 헤더와 데이터를 암호화하여 전송된 결과가 암호를 해독한 결과와 동일한지를 확인하는 방법이다. 대용량 데이터를 보낼 때 무결성을 체크하는 MD5 체크섬도 유사한 방식이다.

그림 13-13에는 데이터의 마지막 바이트에 CRC가 포함되어 있다. 간단히 헤더와 데이터를 바이너리 정보화하여 더하기 연산을 한 결과를 CRC 부분에 첨가하여 보내고, 받은 쪽에서는 시작인 NET를 찾아 길이 Length만큼의 데이터를 모두 합쳐서 CRC 부분과 같으면 깨지지 않은 데이터라고 판단하는 것이다.

물론 1바이트의 크기 만큼을 CRC로 쓴다면 합친 결과가 1바이트 이상이 될 수 있으므로, 1바이트 이상의 값은 버리고 나머지 결과만이 CRC에 저장될 것이다. 예를 들어 100,100,100을 보내면 더하기 결과는 300이고 255를 넘기 때문에 나머지인 44만 CRC 값이

된다. 따라서, 100,100,100,44를 보내는 것이고 받는 쪽에서는 받은 결과인 100,100,100의 CRC 값을 구해 44와 같은지 계산하는 방식이다.

CRC의 경우 1바이트를 사용하게 되면, 확률적으로 깨진 데이터의 CRC 값이 공교롭게 같을 수 있다. 더하기로 CRC를 만든다면, 0,0,0의 세 바이트를 전송할 경우 CRC도 0이 된다. 따라서 받는 쪽은 0,0,0,0을 받게 되고, 0,0,0의 세 바이트를 여러 차례 보내게 되면 받는 쪽은 0, 0, 0, ..., 0을 받으므로 CRC를 통한 검증에 어려움이 발생한다.

이러한 문제는 확률적으로 발생하기 때문에, 더하기 연산보다는 다른 연산이 유리하다. 만약 AND 연산을 쓰게 되면 데이터가 클수록 CRC 값이 0이 될 것이고, OR 연산을 쓰면 마찬가지로 CRC 값이 255에 가까워진다. 따라서, CRC 연산에는 XOR가 많이 쓰인다. XOR는 비트연산에서 같은 두 개의 값에 대해 0, 다른 두 개의 값은 1로 바뀌므로 연속적으로 입력되는 데이터 처리에 대해 특정 값에 수렴되지 않는 장점이 있다.

CRC 연산은 XOR를 통해 수행되고, C 언어에서는 ^ 기호로 표현된다. 하지만 XOR 연산도 문제점이 있다. 로봇 조인트 정보처럼 초기 각도가 모두 0인 경우, 다수의 0 데이터를 전송하게 된다. 이때, 데이터가 모두 0에 해당하고 바이너리 표기로도 0이 되기 때문에 XOR 기반의 CRC 값도 0이 되어 버린다. 이러한 문제를 어떻게 해결할까?

확률적으로 원하지 않는 상황에서 무결성을 체크하는 것이 CRC이기 때문에, 이를 CRC만으로 완벽히 처리하기는 어렵다. 모든 데이터가 0이 입력되는 예시를 피하기 위해서는 프로토콜에 0이 아닌 의미 없는 코드를 섞어 보내거나, +1을 하는 식의 또 다른 암호화, 복호화를 하는 것도 대안이 될 수 있다.

1바이트의 CRC는 많은 문제점이 발생하기 때문에 2바이트로 구성하는 CRC16, 4바이트로 구성하는 CRC32 등이 있다. 좀 더 많은 확률적 사례에 대처하기 위해 많은 데이터를 CRC로 활용하는 것은 무결성 오류의 발생 확률을 낮추는 데 효과적이다.

3.4 스레드 구성

앞서 2.4절에서 스레드의 동작과 이벤트 방식의 적용 사례를 다루어 보았다. 이번 절에서는 다양한 스레드 구성의 사례와 데이터 공유 오류에 대한 문제를 간략히 소개한다.

한 개의 프로세스에 한 개의 스레드를 사용하는 일반적인 프로그램과 달리, 모든 통신에

는 한 개 이상의 스레드가 추가된다. 통신에서 대기 모드는 Blocking 문제가 발생하고 시스템이 멈출 수 있기 때문에, 스레드를 추가하여 그 안에 통신 루틴을 넣어 Blocking이 발생해도 시스템에 영향을 주지 않도록 구성하는 것이 일반적이다.

이러한 경우, Main 기능 또는 사용자 인터페이스(UI)가 포함된 프로세스용 주 스레드와 통신 기능이 포함된 통신 스레드 또는 제어기가 탑재된 제어 스레드 간에는 서로 공용되는 데이터 때문에 다양한 데이터 공유 오류가 발생하고, 이에 따라 프로그램이 멈춰버리는 현상이 발생하게 된다. 정확한 이유 없이 프로그램이 멈추는 많은 사례가 바로 멀티 스레드 환경에서 발생하므로, 통신과 제어가 필요한 로봇 시스템의 기능 통합 시에 스레드의 이해 부분이 중요한 역할을 차지한다. 먼저 몇 가지 기본적인 전제를 정의해보자.

1. 두 개의 스레드가 동시에 한 데이터를 사용하는 경우, 시스템은 오류가 발생한다.
2. 동시에 한 데이터를 사용하지 않게 하기 위해, 뮤텍스 또는 스레드를 멈추거나 재시작하는 과정의 이해가 필요하다.
3. Sleep 또는 Idling 상태가 없는 스레드 사용은 시스템의 과부하를 일으킨다.
4. 스레드의 시작과 종료, 멈춤과 재시작에 대한 명령어 이해가 필요하다.
5. Thread-safe 기능은 스레드 간 데이터 접근에 대해 안전 기능이 포함된 경우를 의미한다.

프로그램이 이유 없이 멈추는 경우는 1번 전제에 의해서 발생한다. Windows나 Linux 모두 스레드가 동시에 데이터에 접근하면 멈추게 된다. 만약 멀티 스레드 사용 중에 프로그램이 멈추면, 2번의 뮤텍스 또는 스레드 사용 방식에 변화가 필요하다.

이벤트 프로그래밍에 대한 기본 프레임워크 없이 스레드를 많이 사용하는 대표적 언어는 JAVA이다. JAVA의 많은 사례는 스레드에 기반을 두고 있고, 이벤트 기능을 스레드에 합쳐 사용하는 사례가 많다. JAVA 프로그램의 경우, Virtual Machine에 의한 리소스 점유가 기본적으로 높지만, 사실 잘못된 스레드 사용에 따라 시스템 리소스가 과도하게 사용되는 경우도 많다. Sleep, Idling의 대기가 없는 스레드는 무한 루프에 해당하여 CPU 점유율을 100%로 만든다. JAVA의 경우, Thread-safe에 기반을 둔 코드와 그렇지 않은 경우가 있어 구별이 필요하며, 특히 코드를 카피하여 사용하는 경우 Thread 부분의 성능을 반드시 체크하는 것이 필요하다.

이벤트 기반 프로그래밍의 경우, 메시지 발생은 Thread-safe, 즉 멀티 스레드에 의한 1번 상황을 피할 수 있는 방법론이다. 정확히 메시지는 동일 스레드 안에서만 발생시키는 방식이며, 다른 스레드 간 메시지 발생의 경우 사용하는 언어의 프레임워크에 따라 다르기 때문에 함부로 사용하면 많은 문제를 발생시킨다.

시스템 부하를 줄이고 스레드 간 충돌을 회피하기 위해서는 뮤텝스 또는 스레드를 원하는 시점에만 정확히 동작시키는 방식을 사용한다. 이를 위해서는 뮤텝스 및 스레드 정지, 재시작에 대한 정확한 이해가 필요하다.

3.4.1 스레드 사용의 이해

스레드는 사용하는 방식에 따라 다양한 사례가 있으나, 스레드 상의 프로세스가 어떻게 동작하는지 이해를 돕기 위해 다음 두 가지 사례를 사용하기로 하자.

그림 13-14 a)의 경우는, 프로세스 스레드인 A와 사용자 스레드인 B 간의 관계를 표현하고 있다. A와 B, 각 두 개의 스레드는 매우 빠른 속도로 무한 루프를 돌고 있는 중이다. A는 UI 처리 등을 담당하고, B는 제어 루틴을 사용한다고 가정하자. 이때, A는 B 스레드에 정지 또는 재시작 명령을 보내 B 스레드의 동작을 조절할 수 있다.

A와 B 간의 데이터 교환을 위해 파라미터, Param이 정의되어 있고 A와 B 스레드는 각각 파라미터에 접근 가능한 상태이다. 이러한 경우가 대부분의 제어 관련 스레드에 해당한다. A는 목표값을 파라미터에 넣어 B가 참조하도록 하고, B의 현재 각도는 마찬가지로 파라미터를 통해 A에서 참조할 수 있다.

B는 제어를 위해 Sleep을 1ms만 주게 되면, 약 1,000Hz로 동작하게 된다. 제어의 목표값을 A에서 파라미터에 전달하는 순간, B에서 목표값을 제어 루틴에서 사용하게 되면 앞선 전제 1에 해당하는 데이터의 동시 접근에 의해 프로그램은 자동 종료된다. 하지만 고속 동작하는 B가 목표값에 접근하지 않을 때, A에서 목표값을 살짝 변경하면 이 프로그램은 정상 동작한다. 이러한 충돌 문제는 확률적으로 결정된다. B의 속도가 느려지면, 동시 접근 가능성이 떨어지기 때문에 안전해질 수 있다. 하지만 B가 좀 더 빠르게 고속으로 움직이면 충돌의 가능성이 좀 더 높아지게 된다.

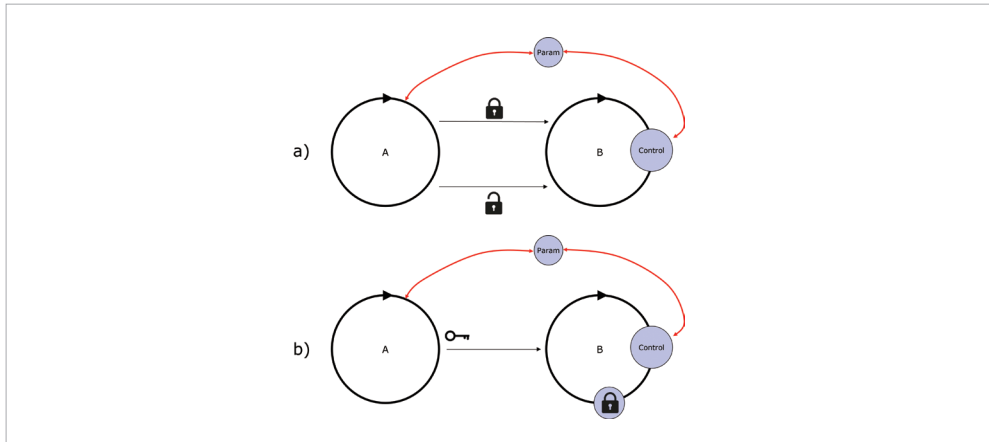


그림 13-14 두 종류의 스레드 사용 방식

그림 13-14 b)를 살펴보자. 스레드 B가 동작을 하면, 제어 루틴인 Control을 실행하고는 다음 루틴에서 자물쇠가 동작한다. 스레드 B가 자기 자신을 중지시키는 경우이다. 스레드 B가 멈춰 있는 상태에서는, 스레드 A가 파라미터에 접근해도 전혀 문제가 발생하지 않는다. B가 멈춰 있기 때문에, A는 마음 놓고 파라미터에 읽거나 쓰기를 해도 문제가 되지 않는다. A가 파라미터에 접근하는 작업이 끝나면, A는 B를 동작하기 위해 열쇠를 B에 주고 B는 자물쇠가 풀려 다시 동작하기 시작한다.

b)의 경우, 스레드 B가 A의 명령에 따라 동작하고 자동으로 멈추기 때문에 일회성 작업을 수행하기 편리하다. 또한 평균적으로 B가 멈춰 있는 경우가 대부분이기 때문에 A에서 파라미터에 접근해도 무방한 것처럼 느껴지게 된다. 또한 B는 A에 의해서 동작 여부가 결정되기 때문에 A와 B 두 가지 스레드의 동기화가 필요할 경우 편리하다.

하지만 a) 또는 b)의 경우 모두 동시 접근할 가능성에 차이만 있을 뿐, 확률적으로 동시 접근에 의해 프로그램이 종료될 가능성이 있다. 따라서, 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해 스레드를 관리하는 커널의 도움이 필요하다. 즉, 뮤텍스(Mutex) 변수가 필요하다.

3.4.2 뮤텍스의 사용

두 개의 스레드가 동시에 데이터에 접근하는 일을 막기 위해, 스레드를 멈추고 데이터를 읽거나 쓰고 다시 스레드를 동작하는 것과 유사하게 뮤텍스를 사용한다. 뮤텍스는 스레드를 사용하는 코드에서는 필수적이며 반드시 사용해야 한다. 기본적인 구조는 다음 그림과

같다.

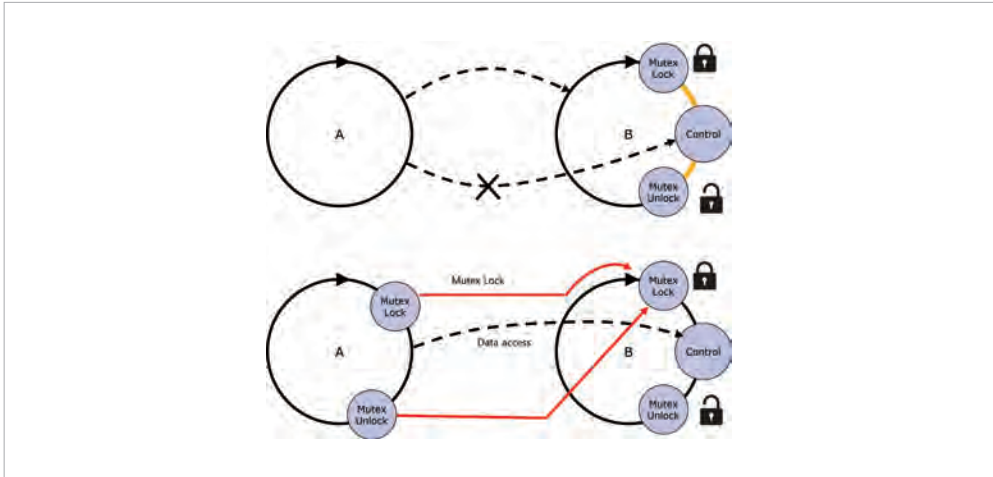


그림 13-15 뮤텝스에 의한 접근 중지 사례

그림 13-15에서 위쪽 그림의 경우, B 스레드에는 뮤텝스를 잠그고 풀어주는 구조를 사용한다. B 스레드 자체에서 뮤텝스를 잠그기 때문에 필요한 작업을 하는 동안 다른 스레드가 제어에 필요한 변수를 건드리지 못하게 된다. 작업이 종료되면 뮤텝스를 풀어 다른 스레드가 해당 변수를 참조할 수 있도록 한다.

아래쪽 그림의 경우에는 A 스레드가 뮤텝스를 잠근다. 이때 곧바로 B 스레드의 뮤텝스가 잠기지지는 않고, B 스레드가 진행되면서 뮤텝스 잠금에 도달하면 이때 A 스레드에서 뮤텝스 잠금 기능이 동작한다. B 스레드는 뮤텝스가 잠겨 있기 때문에 동작을 하지 못하고 멈춰 있게 되고, 이때 A 스레드는 제어에 필요한 변수를 건드리게 된다. 조심할 부분은 A가 뮤텝스를 잠그고 곧바로 B의 제어 변수를 참조하더라도, B 스레드는 아직 뮤텝스까지 도달하지도 못했고 변수를 사용하지도 않고 있으므로 데이터 동시 접근에 의한 충돌이 발생하지 않는다. A 쪽의 작업이 끝나면 B는 뮤텝스 부분에서 멈춰 있는 상태이고, A에서 뮤텝스를 풀어주기 때문에 B는 자신의 동작을 하게 된다.

따라서, 제어에 사용하는 변수를 A, B 스레드에서 참조할 때는 뮤텝스를 잠그고, 사용하고, 풀어주도록 만들어져 있기 때문에 A, B 스레드에서 동시에 변수에 접근할 수가 없다. 물론 이러한 구조는 간단히 일반적인 변수, 예를 들어 `who_use_variable=A or B`와 같은 변수

를 사용해서도 비슷한 효과를 만들 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 어떠한 변수를 써서 이와 유사한 기능을 만들더라도 이 변수 자체가 A와 B 스레드에서 동시 접근하게 되면 충돌이 일어나 프로그램이 강제 종료된다. 이러한 변수의 기능을, 스레드를 관리하는 커널에서 제공하는 것이 뮤텝스이다.

모든 통신과 제어문에는 스레드와 뮤텝스가 사용된다. 뮤텝스가 없는 것처럼 보이는 경우 중 하나가 메시지나 이벤트에 의한 호출인데, 이 경우는 사실 호출된 이벤트 함수 전후에 뮤텝스가 배치되어 있고 사용자는 함수에서 데이터에 접근하기 때문에 뮤텝스가 없는 것처럼 느끼게 된다. 통신과 제어문은 스레드와 뮤텝스가 같이 쓰이기 때문에 이에 대한 이해가 반드시 필요하다.

스레드와 뮤텝스 사용과 관련한 간단한 예시를 추가로 들어보자. 만약 A가 UI 스레드에서 B의 제어기에서 사용되는 변수, 예를 들어 각도를 A 스레드의 화면 UI에 표현하고자 한다. B가 동작할 때마다 제어에 의해 각도가 조금씩 변하게 되는데 이를 A에 표기하게 되면 어떤 문제가 발생할까? B는 제어기이므로 고속으로 반복 동작하는 스레드이고, 매번 A에 각도를 전달한다면 어떻게 될까? 첫째로, A 스레드에는 B처럼 뮤텝스가 설치되지 않았기 때문에 A 스레드에서 동시 접근에 의한 충돌이 확률적으로 발생한다. 따라서 B가 A에 접근하여 변수를 전달해서는 안 된다. 둘째로, A는 UI 스레드이기 때문에 속도가 좀 느린 이벤트 시스템이다. B가 고속으로 반복 동작하기 때문에 A 스레드의 화면 갱신이 1,000Hz가 될 수 없다. 사람은 1,000Hz로 화면이 갱신되는 것을 느낄 수 없다. 따라서 너무 많은 데이터 갱신은 시스템의 과도한 부하만 만들기 때문에 좋은 방법이 아니다.

이러한 경우에는 폴링을 사용하는 것이 일반적이다. A 스레드는 타이머를 사용하여 주기적으로 B의 뮤텝스를 잠그고 데이터를 참조하고 뮤텝스를 풀고 난 뒤, A의 UI를 업데이트한다. B가 변화될 때마다 A를 업데이트하는 것이 아니라, A에서 특정 주기마다 B에 접근하여 데이터를 가져가기 때문에 폴링 방식에 해당한다.

이를 토대로 생각해보면, A에서 너무 많이 B에 접근하는 것은 뮤텝스에 의해 B를 자주 멈추게 하기 때문에, B의 제어기 성능에 대한 실시간성이 떨어지게 된다. 따라서, A에서의 모니터링 주기를 불필요하게 빠르게 하는 것은 제어 성능에 영향을 주므로 자제하는 것이 필요하다.

4. 다양한 통신 기법 사례

시스템 또는 장치 간 통신에는 다양한 사례가 있다. 많은 경우 통신 프로그래밍 자체를 어렵게 생각하지만 실제로는 연결 자체가 가능한가를 확인하고 목적에 맞는 속도, 프로세스 관리가 되는지 여부의 판단에 더 많은 시간이 소요된다. 특히 가능 여부에 따라 초기 시스템 구성도의 설계가 중요하기 때문에 빠르게 가능성 여부를 판단하는 것이 더 중요하다.

시스템 간의 연동은 대체로 통신을 사용하여 해결하지만 조금 더 어려운 분야 중 하나는 프로세스 사이의 통신이라 할 수 있다. 특히 최근 오픈소스 활용 사례가 증가하면서 타인이 작업한 모듈을 라이브러리화하여 사용하기 어려운 경우, 프로세스 통신 또는 나아가 임베딩 기법을 활용하는 것이 매우 중요하다. 프로세스 간 통신을 Internal Process Communication, IPC라 부른다. 시스템에 따라 다르지만, Windows에서 IPC 통신은 대략 9가지 정도가 있으며 많이 사용되는 사례로 3가지 정도가 있다.

또한 블루투스 등의 무선 장치 활용 여부도 필요하다. 최근의 BLE 등장에 따라, 기존 블루투스의 시리얼 통신이 크게 바뀌어 많은 혼란을 야기하기도 하였다. EtherCAT의 등장도 제어와 관련된 이슈를 만들어내며 정착하기까지 거의 10년 정도의 시간이 필요했다.

본 절에서는 이러한 통신 가능성에 대한 다양한 경험을 바탕으로 필자가 사용, 또는 테스트한 다양한 통신 기법을 사례별로 정리해보고자 한다.

4.1 네트워크 프로그래밍

네트워크를 사용하는 것이 사실상 가장 쉬운 방법이다. A와 B 프로그램이 모두 최소한의 수정이 가능한 상황이라면, 소켓에 기반을 둔 TCP/IP 또는 UDP를 사용하면 같은 PC 내의 프로그램 간 통신이 용이하다. A는 서버, B는 클라이언트로 구성하여 서로 연결하도록 만들면, 빠른 스피드와 통신 이벤트로 서로 양방향 통신이 가능하다.

소켓 사용은 포트를 정의하고, 같은 PC를 지칭하는 localhost 또는 127.0.0.1에 접근함에 따라 같은 PC 내 프로세스 간 네트워크 구성이 가능하다. 어떻게 같은 PC에서 동일한 포트를 사용할 수 있을까? 소켓에서 사용하는 포트는 OS에서 다시 물리적 포트를 재매핑하기 때문에 실제로는 서로 다른 포트 간 접속을 통해 가능하다. 또한 한 프로세스를 서버로 작성

하기 때문에, PC 외부에서도 해당 프로세스에 네트워크로 접근할 수 있는 장점이 있다.

4.2 Matlab과 응용 프로그램 연결

Matlab과 응용프로그램의 연결은 매우 유용한 방법 중 하나이다. 이는 프로세스 간 통신인 IPC 기법 중 하나인 COM 기반의 Automation 방식을 사용하거나, 또는 소켓 기반의 네트워크 프로그래밍을 사용한다. Windows에서 오피스 또는 Internet Explorer 같은 프로그램은 Automation에 의해 다른 프로그램에서 접근 및 실행을 할 수 있다. 특히 COM+ 방식을 적용하면, 응용프로그램 내에 임베딩할 수도 있다.

Automation은 C/C++을 이용하거나 또는 C#을 이용하여 조금 더 쉽게 활용할 수 있다. Matlab은 Automation에 의한 호출, 명령 전달, 특히 데이터 전달이 가능하기 때문에, 자신의 응용 프로그램에서 Matlab을 호출하고 배열 데이터를 전송, Matlab 내에서 그래프를 실시간으로 그리는 것에도 유용하다. 이러한 방식은 응용프로그램을 잠시 중지하고, Matlab 내에 전송된 데이터를 확인, 가공, 저장할 수 있어 유용한 방법 중 하나이다.

또 다른 방식은 Matlab 내의 소켓 기능을 활용하여 Matlab이 서버 또는 클라이언트가 되도록 만드는 것이다. Linux 환경에서는 Matlab 연동을 위해 JAVA를 활용할 수 있으나, 로봇과 연동하는 데 어려움이 있어 소켓을 활용하는 것이 유리하다.

4.3 웹 브라우저와 응용 프로그램 연결

웹 브라우저와 응용 프로그램의 연결은 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 소켓을 이용하여 간단한 웹 서버를 만들어서 웹 브라우저가 서버 주소인 127.0.0.1에 클라이언트로 접근하게 하는 방법이 있다. 또 다른 방법은 Web 화면인 CHtmlView를 응용프로그램 안에 임베딩하는 방식이다.

전자의 경우도 다양한 방법이 있다. 크롬 계열은 크로미엄 코드를 수정하여 응용프로그램과 연동되는 전용 브라우저를 사용하거나, Node.js를 이용하여 응용프로그램 연동을 하거나, 웹 포트인 80 포트를 이용하여 서버를 구현하는 세 가지 유형이 있다. Node.js가 동작하는 원리 또한 세 번째 언급한 웹 서버를 만들어 사용하는 방법과 동일한 방식이다.

후자인 응용프로그램 안에 임베딩하는 방식이 좀 더 수월한 방식이다. 응용프로그램 안에

웹 화면을 구성하고 웹 개체에 자바스크립트를 이용하여 접근하게 되는데, 웹에서 응용프로그램 안으로는 URL 텍스트에 정보를 추가하여 보내고, 응용프로그램은 자바스크립트 컴포넌트에 접근하여 명령을 웹 화면에 보낼 수 있다. 이러한 방식은 WebOS에서도 동일하게 사용된다.

이처럼 웹과 응용프로그램을 연동하게 되면, 웹의 다양한 명령을 이용하여 화면 GUI를 손쉽게 작성하고 편집이 용이하기 때문에 많이 활용되고 있다. 키오스크, 광고판, 서비스 로봇의 모든 화면은 웹으로 구성된다.

4.4 공유 메모리

공유 메모리(Shared memory)는 손쉬운 데이터 교환 방식 중 하나이다. 한 응용프로그램의 메모리 공간 안에 특정 부분을 비워두고 다른 프로세스에서 접근할 수 있도록 설정하면, 커널에서 프로세스 간 공유에 의한 충돌을 방지해주는 기능이다.

공유 메모리는 잘 알려진 방법이지만 속도가 아주 빠른 방법론은 아니다. A와 B 프로세스가 공유 메모리를 이용하고 있을 때에, A가 B로 데이터를 직접 보내지는 않는다. A는 B에게 보낼 데이터를 공유 메모리에 써넣으면, 시간이 지나 B가 공유 메모리를 확인하여 자신에게 온 데이터를 확인하는 것이다. 즉, 데이터 확인은 폴링 방식으로 진행된다.

데이터 수신을 고속으로 하기 위해서는 양쪽 프로세스는 모두 공유 메모리를 반복 확인하는 스레드를 사용해야 한다. 주기적으로 공유 메모리를 확인하고, 자신에게 해당하는 내용이 전달되면, 이때 이벤트를 발생하여 활용하는 방식이 필요하다. 고속 처리를 위해서는 공유 메모리의 지속적 확인이 필요하기 때문에 대용량 데이터 전달, 비교적 느린 통신에 적합하다.

4.5 블루투스 사용

로봇 시스템에 사용되는 블루투스 기능은 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 블루투스 칩을 이용하여 RS232 방식의 시리얼 통신을 지원하는 기능이고, 다른 하나는 GATT를 사용하는 저전력의 BLE 기능이다. 시판되는 블루투스 칩에 따라 기능이 다르기 때문에 배경 지식에 따른 선택이 필요하다.

전자의 경우, 블루투스가 삽입된 PC를 사용하거나 아니면 USB 기반의 블루투스 Dongle 을 이용한다. 시리얼 통신 드라이버를 통해, Windows 장치 관리자 또는 리눅스의 /dev 장치 경로에 블루투스 드라이버가 UART 통신 형태로 등록되어야 하며, 이 경우는 일반적인 RS232 프로그래밍이 가능하다.

후자인 BLE 경우는 Windows 8 이후부터 사용할 수 있으며 GATT 기반 프로그래밍을 통해 가능하다. BLE 칩을 사용하는 경우 특이점은, 최대 전송 가능한 버퍼의 크기가 20byte로 제한이 되어 있기 때문에, 여러 차례에 걸쳐 데이터를 분리하고 무결성 체크를 하여 전송해야 한다는 것이다. 주의할 점은 Windows 8은 BLE 장치 접근이 가능하나, Windows 10에서는 무선 장치에 대한 보안 강화로 대부분의 비표준 BLE 연결을 막아 놓은 상태이며, 업데이트를 통해 지원을 늘리는 추세라 당분간 BLE 사용이 어려운 상황이다.

안전표준과 인증



1. 산업안전보건법의 체계

1.1 산업안전보건법의 역사

우리나라의 산업안전보건에 관한 법은 1953년 5월 10일 법률 제286호로 “근로기준법”이 제정되면서 근로자의 안전과 보건에 관한 제6장에 안전보건 부분을 두고, 제64조부터 제73조까지 위험방지, 안전장치, 유해물 제조금지, 안전보건관리자, 건강진단 등을 규정하고 있었으며, 이후 1961년 9월 11일 “근로보건관리규칙”이 제정, 공포되고, 1962년 5월 7일에는 “근로안전관리규칙”이 제정, 공포되면서 우리나라의 산업안전보건관리 제도에 대한 구체적인 틀이 마련되었다.

1980년대 들어 경제의 고도성장으로 사업장 기계설비의 대형화, 고속화 및 건설공사의 대규모화 등에 따른 중대재해가 급증하고, 유해물질의 대량사용 등으로 새로운 직업성 질병이 증가함에 따라 정부에서는 산업사회의 급속한 변화에 대응하기 위한 산업안전보건 대책을 추진하기 위해 산업안전보건 분야를 근로기준법에서 분리하여 새로운 독립법으로서 제정을 추진하게 되었다. 1981년 11월 29일 “산업안전보건법 제정(안)”이 국회에 제안되어, 1981년 12월 18일 국회 본 회의에서 통과되었으며, 1981년 12월 31일 법률 제3532호로 공포됨으로써 우리나라의 산업안전·보건에 관한 독립법인 산업안전보건법이 탄생하게 된 것이다. 이러한 산업안전보건법(이하 산안법)은 1981년 제정된 이후 노동자 보호를 위한 방안으로 부족한 보호기능을 보완하기 위하여 지속적으로 개정하고 있다. [1]

산업안전보건법령은 1개의 법률과 1개의 시행령 및 3개의 시행규칙으로 이루어져 있으며, 하위규정으로서 60여 개의 고시, 17개의 예규, 3개의 훈령 및 각종 기술상의 지침 및 작업환경 표준 등으로 구성되어 있다(그림 14-1). [1]

기본법(헌법)			법령
산업안전보건법(법률)			
산업안전보건법 시행령(대통령령)			
노동부령(3개)			
산업안전보건법 시행규칙	산업안전보건기준에 관한 규칙	유해·위험작업의 취업제한에 관한 규칙	행정규칙
기술상의 지침 및 작업환경의 표준(고시), 예규, 훈령			

그림 14-1 산업안전보건법의 체계

산업안전보건법은 산업재해 예방을 위한 각종 제도를 설정하고 그 시행근거를 확보하며 정부의 산업재해 예방정책 및 사업수행의 근거를 설정하고 있으며, 산업안전보건법 시행령은 법에서 위임된 사항, 즉 제도의 대상, 범위, 절차 등을 설정하고 산업안전보건법 시행규칙은 크게 법에 부속된 시행규칙과 산업안전기준에 관한 규칙, 산업보건기준에 관한 규칙 및 유해·위험작업 취업제한 규칙 등 3개의 규칙으로 구분하고 있다.

산업안전보건법에 부속된 시행규칙은 산업안전보건법과 시행령을 집행하기 위한 일반사항을 규정하고 있고, 산업안전보건기준에 관한 규칙은 사업주가 행할 안전상의 조치와 보건상의 조치에 관한 기술적 사항을 규정하고 있다.

고시는 각종 검사, 검정 등에 필요한 일반적이고 객관적인 사항을 널리 알리어 활용할 수 있는 수치적·표준적 내용이며, 예규는 정부와 실시기관 및 의무대상자 간에 일상적, 반복적으로 이루어지는 업무절차 등을 모델화하여 조문 형식으로 규정한 내용이고, 훈령은 상급기관, 즉 노동부장관이 하급기관, 즉 지방노동관서의 장에게 어떤 업무 수행을 위한 훈시, 지침 등을 시달할 때 조문의 형식으로 알리는 내용이고, 기술상의 지침 및 작업환경표준은 「선박건조 및 수리업의 안전작업 기술기준」 등 안전작업을 위한 기술적인 지침을 규범 형식으로 작성한 기술상의 지침과 「VDT(영상표시단말기) 취급 근로자 작업관리지침」 등 작업장 내의 유해(불량한) 환경요소 제거를 위한 모델을 규정한 작업환경표준이 마련되어 있으며, 이

는 고시의 범주에 포함되는 것으로 볼 수 있으나 법률적 위임근거에 관련된 규정이 아니므로 강제적 효력은 없고 지도, 권고적 성격을 띠고 있다.

1.2 산업안전보건법의 목적

산업안전보건법은 제1조 목적 규정에서 명시한 바와 같이 직장에서의 노동자의 안전과 건강을 확보하는 것을 주된 목적으로 한다.

표 14-1 산업안전보건법의 목적

구분	내용
산업안전보건법	제1조(목적) 이 법은 산업 안전 및 보건에 관한 기준을 확립하고 그 책임의 소재를 명확하게 하여 산업재해를 예방하고 쾌적한 작업환경을 조성함으로써 노무를 제공하는 자의 안전 및 보건을 유지·증진함을 목적으로 한다.
산업안전보건법 시행령	제1조(목적) 이 영은 「산업안전보건법」에서 위임된 사항과 그 시행에 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다.
산업안전보건법 시행규칙	제1조(목적) 이 규칙은 「산업안전보건법」 및 같은 법 시행령에서 위임된 사항과 그 시행에 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

개정 전 산업안전보건법(시행일 2020년 01월 16일)에서는 근로자라는 개념으로 산업안전보건법의 보호대상을 한정하였다. 기존 근로자의 개념은 근로계약을 체결한 자로 한정될 수 있어 일하는 사람의 생명에 대한 안전과 보호가 필요하여 넓은 의미로 일하는 사람이라는 개념 속에 노무를 제공하는 자로 대상 목적을 바꿀 필요가 있었다.

따라서 개정법률 안에서는 근로자라는 범위보다 확대하여 노무를 제공하는 일하는 사람들에게 모든 산업안전보건법을 적용하도록 하여 이 범위 속에는 특수형태 근로종사자, 배달 종사자 등도 해당한다고 보고 있다.

특히 장소적 범위를 나타내는 사업장 단위라는 개념 입장에서 본다면 근로계약을 체결한 근로자라는 범위에 한정할 수 있지만, 노무제공자라고 할 경우에는 넓은 의미의 일하는 사람이라는 개념으로 확대하여 해석할 수 있다고 본다. 여기에서 말하는 노무제공자의 의미는 일하는 사람이라고 볼 수 있지만, 엄밀히 이야기하면 일하는 사람의 범위보다는 개념상 차이가 있다고 본다.

일하는 사람이라는 의미는 일의 제공 또는 수령과 상관없이 넓은 의미를 말하고 있다. 그

러나 노무제공자는 근로자보다는 폭넓은 범위로 볼 수 있지만, 노무라는 측면에서 본다면, 노무의 의미는 채권법의 계약론에서 나오는 상대방이 존재한다는 의미의 용어로, 노무를 제공하게 되면 노무제공을 받는 상대방적인 노무제공을 받는 자가 존재하게 된다. 따라서 근로계약과는 다르게 폭넓은 의미로 노무 종류와는 상관없이 노무제공자라고 하는 것은 근로계약을 체결하는 근로자 개념보다는 넓은 의미이지만, 노무수령자의 존재가 나타날 수 있는 것이다.

다시 말하면 근로기준법의 근로자 또는 이전 산업안전보건법의 보호대상인 근로자의 범위보다는 넓은 의미이지만 계약관계에서 노무수령의 상대방이 나타날 수 있다. 따라서 엄밀히 이야기하면 일하는 사람의 범위와는 다르다고 볼 수 있어 불특정 다수의 일하는 사람의 개념과는 다르다고 볼 수 있다. 그러나 근로자보다는 넓은 범위라고 볼 수 있다.

일하는 사람은 근로계약을 체결하여 당해 사업장에서 일하는 근로자 외에도 근로계약을 체결하고 다른 장소에 작업하는 경우도 해당한다. 그래서 예를 들면, 배달종사자, 프랜차이즈 유형의 근로, 특수형태 근로종사자처럼 사용자성을 가지고 있는 근로자, 간병인처럼 사업주 대상이 모호한 경우도 넓은 의미의 노무제공자라고 할 수 있다고 본다.

따라서 산업안전보건법의 노무제공자 속에는 근로계약을 체결하지 않아도 노무를 제공하는 자 속에 배달종사자, 프랜차이즈 유형의 근로와 특수형태 근로종사자, 간병인 등도 포함된다고 볼 수 있다.

앞으로 경제적 상황을 고려하면 다양한 유형의 근로관계 유형이 나올 수 있어 지속적인 연구가 필요한 분야이다. [1]

1.3 산업안전보건법의 주체 및 의무

산업안전보건법의 의무 주체는 ‘사업주’이다. 사업주라 함은 근로기준법상의 의무주체인 ‘사용자’와 달리 사업경영 이익의 귀속주체를 의미한다. 법인기업은 경우 그 법인인, 개인기업인 경우에는 사업경영주가 이에 해당한다. 그렇지만 산업안전보건법은 사업주 이외에 많은 자에게 의무를 부과하고 있다. 위험한 기계나 유해물의 제조자, 수입자, 특정사업의 발주자, 건축물의 대여자, 수급인, 근로자 등이다.

산업안전보건법의 규정 대부분은 사업주와 근로자 사이에 성립하는 근로계약관계를 전제

로 하고 있지만, 몇몇 규정은 물건 또는 행위에 관련되는 자 모두를 규제대상으로 한다. 즉, 직접적인 고용관계가 없더라도 산업안전보건에 영향을 미치는 모든 자를 의무주체로 한다. 이러한 의무주체 중 본 절에서는 사업주 및 근로자의 의무에 관해 기술한다.

사업주 의무는 기존에 산업안전보건법과 같은 의미로 산업장의 안전보건 예방 조치는 사업주가 해야 한다는 것이다. 그러나 이번 개정되어 시행하는 법률 속에는 목적 조항에서 노무제공자라는 포괄적인 넓은 범위로 제정되어 짐에 따라 해당하는 노무제공자의 산업안전보건법 보호대상으로 포함될 수 있는 것이다. 이런 의미에서 사용자성을 가지고 있는 특수형태 근로종사자, 사업장이라는 장소적 범위가 문제가 되는 배달종사자들도 모두 노무제공자라는 범위 안에 넣고 사업주의 의무 속에 포함시킨 것이다.

사업주는 이 법과 이 법에 의한 명령에서 정하는 산업재해 예방을 위한 기준을 준수하며, 당해 사업장의 안전, 보건에 관한 정보를 근로자에게 제공하고, 근로조건의 개선을 통하여 적절한 작업환경을 조성함으로써 근로자의 신체적 피로와 정신적 스트레스 등으로 인한 건강장해를 예방하고, 근로자의 생명보전과 안전 및 보건을 유지, 증진하도록 하여야 하며, 국가에서 시행하는 산업재해 예방정책에 따라야 하도록 규정하고 있고, 기계·기구 기타 설비를 설계·제조 또는 수입하는 자, 원재료 등을 제조·수입하는 자 또는 건설물을 설계·건설하는 자는 그 설계, 제조, 수입 또는 건설을 함에 있어서 이 법과 이 법에 의한 명령에서 정하는 기준을 준수하여야 하고, 그 물건의 사용에 의한 산업재해발생의 방지에 노력해야 하도록 규정하고 있다.

근로자의 의무는 이 법과 이 법에 의한 명령에서 정하는 산업재해 예방을 위한 기준을 준수하고 사업주 등이 실시하는 산업재해의 방지에 관한 조치에 따라야 하는 의무규정이 있으며 이 규정은 노무제공자의 일반적인 준수의무규정이다.

표 14-2 산업안전보건법상의 사업주 및 근로자의 의무

구분	내용
사업주 등의 의무 (제5조)	① 사업주(제77조에 따른 특수형태 근로종사자로부터 노무를 제공받는 자와 제78조에 따른 물건의 수거·배달 등을 중개하는 자를 포함한다. 이하 이 조 및 제6조에서 같다)는 다음 각 호의 사항을 이행함으로써 근로자(제77조에 따른 특수형태 근로종사자와 제78조에 따른 물건의 수거·배달 등을 하는 사람을 포함한다. 이하 이 조 및 제6조에서 같다)의 안전 및 건강을 유지·증진시키고 국가의 산업재해 예방정책을 따라야 한다. <개정 2020. 5. 26.> 1. 이 법과 이 법에 따른 명령으로 정하는 산업재해 예방을 위한 기준 2. 근로자의 신체적 피로와 정신적 스트레스 등을 줄일 수 있는 쾌적한 작업환경의 조성 및 근로조건 개선 3. 해당 사업장의 안전 및 보건에 관한 정보를 근로자에게 제공 ② 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 발주·설계·제조·수입 또는 건설을 할 때 이 법과 이 법에 따른 명령으로 정하는 기준을 지켜야 하고, 발주·설계·제조·수입 또는 건설에 사용되는 물건으로 인하여 발생하는 산업재해를 방지하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다. 1. 기계·기구와 그 밖의 설비를 설계·제조 또는 수입하는 자 2. 원재료 등을 제조·수입하는 자 3. 건설물을 발주·설계·건설하는 자
근로자의 의무 (제6조)	근로자는 이 법과 이 법에 따른 명령으로 정하는 산업재해 예방을 위한 기준을 지켜야 하며, 사업주 또는 「근로기준법」 제101조에 따른 근로감독관, 공단 등 관계인이 실시하는 산업재해 예방에 관한 조치에 따라야 한다.

* 출처: 산업안전보건법. 법제처, 2020(<https://www.moleg.go.kr>)

2. 로봇의 안전인증

2.1 산업용 로봇의 재해현황

산업용 로봇에 의한 재해자 수 및 사망자 수(2011년~2015년)

2011년에서 2015년 사이에 산업용 로봇에 의해 발생한 재해자 수는 총 207명으로 한해 평균 41.4명의 재해자가 발생한 것으로 나타났으며, 사망자 수는 총 15명으로 한해 평균 3명의 사망자가 발생한 것으로 나타났다. [2]

표 14-3 5년간 산업용 로봇에 의한 재해자 수 및 사망자 수(2011~2015년)

(단위: 명)

중업종명	2011	2012	2013	2014	2015	총계(명)
재해자수	42	52	37	41	35	207
사망자수	2	6	0	3	4	15

규모별 재해현황

규모별 재해자 수는 50인 미만 104명(50.2%), 50인 이상 103명(49.8%)이고 사망자 현황은 50인 미만 7명(46.7%), 50인 이상 8명(53.3%)으로 나타났다.

표 14-4 산업용 로봇 관련 제조업 규모별 재해현황

(단위: %, 명)

규모	최근 5년간 재해자 현황		최근 5년간 사망자 현황	
	재해자(명)	점유율(%)	사망자(명)	점유율(%)
50인 미만	104	50.2	7	46.7
50인 이상	103	49.8	8	53.3
총계	207	100.0	15	100.0

발생 형태별 재해현황

전체 재해자 수 207명 중 끼임 110명(53.1%), 부딪힘 68명(32.9%), 물체에 맞음 11명(5.3%) 순으로 나타났다.

표 14-5 산업용 로봇 관련 제조업 발생 형태별 재해현황

(단위: %, 건수)

구분	끼임	부딪힘	물체에 맞음	떨어짐	절단·베임·찢림	기타	총계
건수(%)	110(53.1%)	68(32.9%)	11(5.3%)	9(4.3%)	4(1.9%)	5(2.4%)	207(100.0)

손상부별 재해현황

재해자 총 207명 중 신체 손상부가 손, 머리·얼굴, 몸통, 허리·척추인 경우가 163명(78.8%), 사망자 총 15명 중 신체 손상부가 손, 머리·얼굴, 몸통인 경우가 11명(73.4%)을 차지한다.

표 14-6 산업용 로봇 관련 제조업 신체 손상부별 재해현황

(단위: %, 명)

신체 손상부	재해자수(%)	사망자수(%)
손	60 (29.0)	1 (6.7)
머리, 얼굴	47 (22.7)	4 (26.7)
몸통	32 (15.5)	6 (40.0)
허리, 척추	24 (11.6)	1 (6.7)
팔	12 (5.8)	0 (0.0)
골반	7 (3.4)	0 (0.0)
발	4 (1.9)	0 (0.0)
목	3 (1.4)	0 (0.0)
다리	1 (0.5)	0 (0.0)
분류 불가	17 (8.2)	3 (20.0)
총계	207 (100.0)	15 (100.0)

작업 내용별 재해현황

작업 내용별 재해현황은 수리·점검·준비·설치 시 재해자 134명(64.7%), 사망자 9명(60.0%)으로 나타났고, 일반운전(제품생산) 시 재해자 63명(30.4%), 사망자 3명(20.0%)으로 나타났다.

표 14-7 작업내용별 재해현황

(단위: %, 명)

작업내용	최근 5년간 재해자 현황		최근 5년간 사망자 현황	
	재해자(명)	점유율(%)	사망자(명)	점유율(%)
수리·점검·준비·설치	134	64.7	9	60.0
일반운전(제품생산)	63	30.4	3	20.0
기타	10	4.8	3	20.0
총계	207	100.0	15	100.0

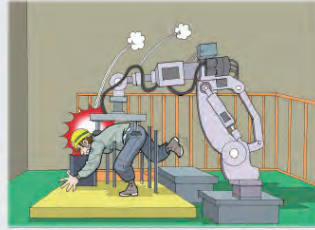
산업용 로봇 관련 대표적 재해사례

재해발생과정

자동차부품 생산공정에서 적재대에 적재된 부품이 이송용 로봇의 매니퓰레이터(진공흡착판)에 흡착되지 않자 부품을 적재대에서 분리하기 위해 로봇의 운전범위 내부로 접근하였다가 로봇의 매니퓰레이터와 부품 적치대 사이에 협착되어 사망한 재해임

재해 발생원인

- 로봇 운전범위 내 접근시 안전조치 미흡
- 방호장치 미설치



재해 예방대책

- 로봇의 운전범위 내로 접근할 경우에는 로봇의 운전을 정지시키고 조작반에 "점검중" 표시판 및 "전원스위치 잠금장치"를 설치하여 다른 근로자가 임의로 조작할 수 없도록 하여야 함
- 근로자 임의 접근에 의한 재해를 방지하기 위하여 산업용 로봇의 운전범위 주변에 안전매트 또는 높이 1.8m 이상의 방책을 설치하여야 함

시사점

산업용 로봇과 관련한 재해사례를 분석해 보면, 대부분 재해원인은 방호장치 미작동, 방책 내 개구부 존재, 방책의 미설치 및 불완전한 설치, 출입문 연동장치 설치상태 불량 등으로 확인된다. 즉, 방호장치가 정상적으로 작동하는지 주기적으로 확인하고, 방책을 설치할 경우 출입문 이외의 개구부는 존재하지 않도록 설치하며, 개구부가 존재할 수밖에 없는 경우에는 광전자식 방호장치 또는 안전매트 등을 설치하여 방책 성능의 연속성을 확보한다면 예방이 가능할 것으로 생각한다. 이를 위해서는 산업용 로봇과 관련한 안전기준을 명확하게 제시하고 준수하도록 강제하는 방안이 필요할 것으로 판단된다. 다음 절에서는 산업용 로봇과 관련한 현행 법률 제도에 관해서 살펴본다.

2.2 유해·위험 기계 등에 대한 조치

2.2.1 안전인증

유해하거나 위험한 기계·기구·설비의 사용 전 안전성 확인 및 방호장치, 보호구의 불량품 생산 및 유통을 근절하여 제조, 유통 단계에서부터 근원적인 안전성 확보를 하기 위한 것이다. 고용노동부장관은 유해하거나 위험한 기계·기구·설비 및 방호장치·보호구의 안전성을 평가하기 위해 안전에 관한 성능과 제조자의 기술능력·생산체계 등에 관한 안전인증기준을 정한 것이다.

안전인증대상 기계·기구 등의 안전에 관한 성능(안전인증기준)에 관한 기준은 고용노동부장관이 고시로 정하여 위험기계·기구 의무안전인증 고시(고용노동부고시), 방호장치 의무안전인증 고시(고용노동부고시), 보호구 의무안전인증 고시(고용노동부고시)로 구성되어 있다.

산업안전보건법 제84조(안전인증)

① 유해·위험기계등 중 근로자의 안전 및 보건에 위해(危害)를 미칠 수 있다고 인정되어 대통령령으로 정하는 것(이하“안전인증대상기계등”이라 한다)을 제조하거나 수입하는 자(고용노동부령으로 정하는 안전인증대상기계등을 설치·이전하거나 주요 구조 부분을 변경하는 자를 포함한다. 이하 이 조 및 제85조부터 제87조까지의 규정에서 같다)는 안전인증대상기계등이 안전인증기준에 맞는지에 대하여 고용노동부장관이 실시하는 안전인증을 받아야 한다.

② 고용노동부장관은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 제1항에 따른 안전인증의 전부 또는 일부를 면제할 수 있다.

1. 연구·개발을 목적으로 제조·수입하거나 수출을 목적으로 제조하는 경우
2. 고용노동부장관이 정하여 고시하는 외국의 안전인증기관에서 인증을 받은 경우
3. 다른 법령에 따라 안전성에 관한 검사나 인증을 받은 경우로서 고용노동부령으로 정하는 경우

③ 안전인증대상기계등이 아닌 유해·위험기계등을 제조하거나 수입하는 자가 그 유해·위험기계등의 안전에 관한 성능 등을 평가받으려면 고용노동부장관에게 안전인증을 신청할 수 있다. 이 경우 고용노동부장관은 안전인증기준에 따라 안전인증을 할 수 있다.

④ 고용노동부장관은 제1항 및 제3항에 따른 안전인증(이하“안전인증”이라 한다)을 받은 자가 안전인증기준을 지키고 있는지를 3년 이하의 범위에서 고용노동부령으로 정하는 주기마다 확인하여야 한다. 다만, 제2항에 따라 안전인증의 일부를 면제받은 경우에는 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 확인의 전부 또는 일부를 생략할 수 있다.

⑤ 제1항에 따라 안전인증을 받은 자는 안전인증을 받은 안전인증대상기계등에 대하여 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 제품명·모델명·제조수량·판매수량 및 판매처 현황 등의 사항을 기록하여 보존하여야 한다.

⑥ 고용노동부장관은 근로자의 안전 및 보건에 필요하다고 인정하는 경우 안전인증대상기계등을 제조·수입 또는 판매하는 자에게 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 해당 안전인증대상기계등의 제조·수입 또는 판매에 관한 자료를 공단에 제출하게 할 수 있다.

⑦ 안전인증의 신청 방법·절차, 제4항에 따른 확인의 방법·절차, 그 밖에 필요한 사항은 고용노동부령으로 정한다.

안전인증대상 기계·기구 및 방호장치·보호구로 근로자의 안전보건에 필요하다고 인정되는 것(안전인증대상)을 대통령령으로 정하고 있으며, 그 내용은 시행령 제74조(안전인증대상기계등), 시행규칙 제107조(안전인증대상기계등)이 있다. 그 중 시행령 제74조의 방호장치부분의 “자. 충돌·협착 등의 위험방지에 필요한 산업용 로봇 방호장치”에서 산업용 로봇에 관해 언급하고 있다.

산업안전보건법 시행령 제74조(안전인증대상기계등)

① 법 제84조제1항에서 “대통령령으로 정하는 것”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 것을 말한다.

1. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 기계 또는 설비

가. 프레스, 나. 전단기 및 절곡기(折曲機), 다. 크레인, 라. 리프트, 마. 압력용기, 바. 물러기, 사. 사출성형기(射出成形機), 아. 고소(高所) 작업대, 자. 곤돌라

2. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 방호장치

가. 프레스 및 전단기 방호장치, 나. 양중기용(揚重機用) 과부하 방지장치, 다. 보일러 압력방출용 안전밸브, 라. 압력용기 압력방출용 안전밸브, 마. 압력용기 압력방출용 과열판, 바. 절연용 방호구 및 활선작업용(活線作業用) 기구, 사. 방폭구조(防爆構造) 전기기계·기구 및 부품, 아. 추락·낙하 및 붕괴 등의 위험 방지 및 보호에 필요한 가설기자재로서 고용노동부장관이 정하여 고시하는 것, 자. 충돌·협착 등의 위험 방지에 필요한 산업용 로봇 방호장치로서 고용노동부장관이 정하여 고시하는 것

3. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 보호구

가. 추락 및 감전 위험방지용 안전모, 나. 안전화, 다. 안전장갑, 라. 방진마스크, 마. 방독마스크, 바. 송기(送氣)마스크, 사. 전동식 호흡보호구, 아. 보호복, 자. 안전대, 차. 차광(遮光) 및 비산물(飛散物) 위험방지용 보안경, 카. 용접용 보안면, 타. 방음용 귀마개 또는 귀덮개

② 안전인증대상기계등의 세부적인 종류, 규격 및 형식은 고용노동부장관이 정하여 고시한다.

산업안전보건법 시행규칙 제107조(안전인증대상기계등)

1. 설치, 이전하는 경우 안전인증을 받아야 하는 기계

가. 크레인, 나. 리프트, 다. 곤돌라

2. 주요 구조 부분을 변경하는 경우 안전인증을 받아야 하는 기계

가. 프레스, 나. 전단기 및 절곡기(折曲機), 다. 크레인, 라. 리프트, 마. 압력용기, 바. 롤러기, 사. 사출성형기(射出成形機), 아. 고소(高所)작업대, 자. 곤돌라

2.2.2 자율안전확인인 신고

안전인증과 달리 자율안전확인인 신고 규정을 두어 안전인증대상기계 등이 아닌 유해·위험기계 등으로서 대통령령으로 정하는 것(이하 “자율안전확인대상기계등”이라 한다)을 제조하거나 수입하는 자는 자율안전확인대상 기계 등의 안전에 관한 성능이 고용노동부장관이 정

하여 고시하는 안전기준(이하 “자율안전기준”이라 한다)에 맞는지 확인(이하 “자율안전확인”이라 한다)하여 고용노동부장관에게 신고(신고한 사항을 변경하는 경우를 포함한다)하도록 하고 있다. 이에 자율안전확인 기계 대상은 시행령 제77조에 규정하고 있다.

산업안전보건법 시행령 제77조(자율안전확인대상기계등)

① 법 제89조제1항 각 호 외의 부분 본문에서 “대통령령으로 정하는 것”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 것을 말한다.

1. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 기계 또는 설비

가. 연삭기(研削機) 또는 연마기. 이 경우 휴대형은 제외한다, 나. 산업용 로봇, 다. 혼합기, 라. 파쇄기 또는 분쇄기, 마. 식품가공용 기계(파쇄·절단·혼합·제면기만 해당한다), 바. 컨베이어, 사. 자동차정비용 리프트, 아. 공작기계(선반, 드릴기, 평삭·형삭기, 밀링만 해당한다), 자. 고정형 목재가공용 기계(등근톱, 대패, 루타기, 띠톱, 모떼기 기계만 해당한다), 차. 인쇄기

2. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 방호장치

가. 아세틸렌 용접장치용 또는 가스집합 용접장치용 안전기, 나. 교류 아크용접기용 자동 전격방지기, 다. 롤러기 급정지장치, 라. 연삭기 덮개, 마. 목재 가공용 등근톱 반발 예방장치와 날 접촉 예방장치, 바. 동력식 수동대패용 칼날 접촉 방지장치, 사. 추락·낙하 및 붕괴 등의 위험 방지 및 보호에 필요한 가설기자재(제74조제1항제2호아목의 가설기자재는 제외한다)로서 고용노동부장관이 정하여 고시하는 것

3. 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 보호구

가. 안전모(제74조제1항제3호가목의 안전모는 제외한다), 나. 보안경(제74조제1항제3호차목의 보안경은 제외한다), 다. 보안면(제74조제1항제3호카목의 보안면은 제외한다)

② 자율안전확인대상 기계등의 세부적인 종류, 규격 및 형식은 고용노동부장관이 정하여 고시한다.

산업용 로봇의 경우 자율안전확인신고 대상으로서, 2013년 3월 1일 이후 산업용 로봇을 제조하거나 수입할 경우 해당 산업용 로봇이 자율안전확인기준에 적합함을 신고하여야 한

다. 즉, 제조자(또는 수입자)는 해당 로봇이 자율안전확인기준에 적합한지 위험성평가를 실시하고, 관련 시험을 실시한 후 해당결과를 포함하여 제품의 설명서 등과 함께 신고수리기관에 의무적으로 제출하여야 한다.

2.2.3 안전검사

안전검사란 산업안전보건법 제93조에 따라 유해하거나 위험한 기계·기구·설비를 사용하는 사업주가 유해·위험기계 등의 안전에 관한 성능이 안전검사기준에 적합한지 여부에 대하여 안전검사기관으로부터 안전검사를 받도록 함으로써 사용 중 재해를 예방하기 위한 제도이다.

산업안전보건법 제93조(안전검사)

- ① 유해하거나 위험한 기계·기구·설비로서 대통령령으로 정하는 것(이하 “안전검사대상기계등”이라 한다)을 사용하는 사업주(근로자를 사용하지 아니하고 사업을 하는 자를 포함한다. 이하 이 조, 제94조, 제95조 및 제98조에서 같다)는 안전검사대상기계등의 안전에 관한 성능이 고용노동부장관이 정하여 고시하는 검사기준에 맞는지에 대하여 고용노동부장관이 실시하는 검사(이하 “안전검사”라 한다)를 받아야 한다. 이 경우 안전검사대상기계등을 사용하는 사업주와 소유자가 다른 경우에는 안전검사대상기계등의 소유자가 안전검사를 받아야 한다.
- ② 제1항에도 불구하고 안전검사대상기계등이 다른 법령에 따라 안전성에 관한 검사나 인증을 받은 경우로서 고용노동부령으로 정하는 경우에는 안전검사를 면제할 수 있다.
- ③ 안전검사의 신청, 검사 주기 및 검사합격 표시방법, 그 밖에 필요한 사항은 고용노동부령으로 정한다. 이 경우 검사 주기는 안전검사대상기계등의 종류, 사용연한(使用年限) 및 위험성을 고려하여 정한다.

산업용 로봇의 안전검사의 적용대상은 다음과 같다. [5]

기계·기구	규격 및 형식별 적용범위
산업용 로봇	- 3개 이상의 회전관절을 가지는 다관절 로봇이 포함된 산업용 로봇 셀* *산업용 로봇 셀: 관련된 기계류 및 장비를 포함한 하나 또는 그 이상의 로봇 시스템과 보호영역

산업용 로봇의 안전검사에서의 주요 검사 항목은 다음과 같다.

- 운전모드선택 · 협동운전 요구사항 · 수동 리셋, 기동과 재기동 · 접지 · 자동, 수동운전모드
- 로봇 시스템 배치설계 · 보호영역 및 방책 등 · 비상정지장치 · 펜던트 제어
- 로봇 시스템 정지 기능 · 감응형 방호장치

산업용 로봇의 안전 검사 주기는 다음과 같다.

설비 설치일	검사 주기
2017. 10. 28 이전 설치·사용 설비	2018. 12. 31.까지 최초 안전 검사를 받은 후 매 2년 마다
2017. 10. 29 이후 설치·사용 설비	설비 설치일 이후 3년 이내 최초 안전검사를 받은 후 매 2년마다

산업용 로봇 안전검사 결과서(예시) [5]

신청인	셀 위치	관리번호	제조사	제조년월일
작업종류 및 로봇대수(종 대)	☐ 용접(대) ☐ 조립(대) ☐ 도장(대) ☐ 운반(대) ☐ 검사(대) ☐ 기타(대)			주생산품
셀 능력 (UPH 등)	편성	☐ 합격 ☐ 불합격	검사유효 기간	합격번호
				검사일명

검사 대상											
조항	검사항목	검사여부	조항	검사항목	검사여부	조항	검사항목	검사여부	조항	검사항목	검사여부
		실시 비작용			실시 비작용			실시 비작용			실시 비작용
1	동력전달부품		9	동시동작제어		17	수동 리셋, 기동과 재기동		25	전동기의 과부하 보호	
2	동력의 손실 또는 변동		10	협동운전 요구사항		18	보호영역 및 방책 등		26	절연저항	
3	제어장치		11	협동운전		19	감응형 방호장치		27	방목전기 기계·기구	
4	안전관련 제어 시스템 성능요건		12	속의 운동범위 제한		20	접지		28	제어회로 및 제어기능	
5	운전모드선택		13	전기 접속기구		21	전원 차단장치		29	비상정지장치	
6	자동운전모드		14	명판 등의 표시		22	감전사고 방지		30	초속제한 및 전선해상	
7	수동운전모드		15	로봇 시스템 배치설계		23	배선		31	표시	
8	펜던트제어		16	로봇 시스템 정지 기능		24	과전류 보호		32	경고표시	

활 수 명 목								
번호	검사항목	판정 기준	판정결과*		검사방법**	검사 결과	활용 장비	초점
			합격	불합격				
1	로봇모드선택	-로봇시스템에는 키선택 스위치 등 운전모드 선택장치가 있을 것 - 운전모드 선택 스위치는 하나의 운전모드만 선택 가능 할 것 - 운전모드 선택 스위치에 별도의 운전스위치가 시스템이 작동 될 것			V/A			5
2	자동운전모드	- 자동운전모드에서는 안전장치 정상기능 유지하고, 보호영역 안으로 사람이 들어간 보호장치 기능 작동할 것 - 자동모드의 기능은 보호영역 외부에서 별도의 기능조작에 의해서만 가능할 것			V/A			6
3	수동운전모드	- 수동작업속도에서는 로봇의 속도가 초당 250mm를 초과하지 않아야 하고 조작자에 의해서만 작동되도록 해야 하며, 자동운전이 되지 않을 것 - 수동과수동모드에서는 초기 속도는 초당 250mm 이하로 설정되어 있고, 핸드레드 제어장치는 속도조절 및 속도제한이 가능할 것			V/A			7
4	편던트제어	- 모든 버튼과 잠가는 기동유지장치일 것 - 잠지치가 잠기는 일시에서 연속적으로 유지시키는 경우에만 로봇이 작동할 것 - 편던트 또는 교시제어장치에는 비상정지장치가 설치되어 있을 것			V/A			8
5	협동운전 요구사항	- 협동로봇에는 협동운전 상태를 표시하는 시각표시가 설치되어 있을 것 - 협동운전장치는 바닥표시 등으로 정확하게 표시되어 있을 것			V			10
6	로봇 시스템 배치 설계	- 로봇과 건물 기둥 등의 장애물 사이에 여유 공간이 있을 것 - 운전제어기와 보조장비(보조제어기, 급강하장치 등)는 보호영역 외부에 위치할 것			V			15
7	로봇 시스템정지 기능	- 모든 로봇 시스템은 정지 및 별도의 비상정지 기능을 가질 것 - 시스템의 모든 관련부품에 대하여 작동되는 단일 비상정지 기능을 가질 것 - 로봇 시스템은 외부 보호장치와 연결하기 위하여 하나 이상의 보호정지 회로를 구비하고 있을 것			V/A			16
8	수동, 다중, 기동과 재기동	- 기동과 재기동은 모든 안전기능 및 보호 대책이 정상 작동시에만 가능할 것 - 기동과 재기동 제어는 보호영역 밖에서 수동으로 조작되어야 하며, 보호영역 안에서는 활성화가 불가능할 것			V/A			17
9	보호영역 및 방벽 등	- 제한영역은 보호영역 내에 위치하고, 보호영역은 방벽에 의해 설정될 것 - 방벽은 견고하게 설치하고 도구를 사용해서만 제거할 수 있는 구조일 것 - 방벽에 개구부가 있을 경우 적당자의 위험성 하에 방지조치가 되어 있을 것 - 방벽의 높이는 1,800mm이상일 것(KS B ISO 13857에 따른 경우 1,400mm이상) - 가동식 방벽(슬라이딩방벽)은 연동장치가 설치 될 것			V/E/A	방벽높이 (mm)	자	18
10	감응형 방호장치	- 작업자가 보호영역 내에 있을 가능성이 있는 경우 감응형 방호장치가 보호영역 내에 설치될 것			V/A			19
11	잠지	- 잠지장치는 400V 미만인 경우 1000이하, 400V 이상인 경우 100이하일 것			V/E	(mm)	절지자형 속장기	20
12	비상정지장치	- 비상정지장치는 각 제1 및 그 뒤에 비상정지장치가 필요한 곳에 설치하고, 접근이 용이하게 배치되어 정상적으로 작동될 것 - 비상정지장치는 작동한 이후 수동 복귀시킬 때까지 자동으로 복귀되지 않을 것			V/A			29
13	기타	- 재해발생의 급박한 위험이 있는 경우						

* 판정결과: 해당란에 ○ 표시 ** 검사방법: ㉠ 육안검사 ㉡ 전기검사 ㉢ 작동검사 ㉣ 안전확인대상

* 판정결과: 해당항에 ○ 표시 ** 검사방법: ㉠ 육안검사 ㉡ 장비검사 ㉢ 작동검사 ㉣ 인증확인대상)

2.2.4 산업용 로봇에 관한 산업안전보건기준에 관한 규칙

산업안전보건기준에 관한 규칙 제13절에서는 산업용 로봇에 관련한 교시, 운전, 수리 등의 조치에 대하여 규정하고 있다.

산업안전보건기준에 관한 규칙 제222조(교시 등)는 산업용 로봇의 작동범위에서 교시(Teaching) 작업 시 로봇의 불시작동 또는 오조작에 의한 위험을 방지하기 위하여 지켜야 할 사항에 대하여 규정하고 있다. 산업안전보건기준에 관한 규칙 제223조(운전 중 위험방지)는 로봇이 정상운전 중인 상태에서 발생할 수 있는 위험을 방지하기 위하여 작업자와 로봇의 작업 공간을 분리하기 위한 울타리의 설치, 감응형 방호장치의 설치에 대하여 규정하고 있다. 이는 일반적으로 로봇이 운전 중일 때 근로자가 로봇의 가동범위에 접근함으로써 발생할 수 있는 재해를 예방하기 위한 목적이다. 제224조(수리 등 작업 시의 조치 등)는 로봇의 작동범위에서 수리·검사·조정·청소·급유 또는 결과에 대한 확인 작업을 하는 경우에 근로자

의 위험을 방지하기 위하여 실시하여야 하는 조치에 대하여 규정하고 있다.

산업안전보건기준에 관한 규칙 제222조(교시 등)

사업주는 산업용 로봇(이하 “로봇”이라 한다)의 작동범위에서 해당 로봇에 대하여 교시(敎示) 등[매니플레이터(manipulator)의 작동순서, 위치·속도의 설정·변경 또는 그 결과를 확인하는 것을 말한다. 이하 같다]의 작업을 하는 경우에는 해당 로봇의 예기치 못한 작동 또는 오(誤)작에 의한 위험을 방지하기 위하여 다음 각 호의 조치를 하여야 한다. 다만, 로봇의 구동원을 차단하고 작업을 하는 경우에는 제2호와 제3호의 조치를 하지 아니할 수 있다.

1. 다음 각 목의 사항에 관한 지침을 정하고 그 지침에 따라 작업을 시킬 것

가. 로봇의 조작방법 및 순서, 나. 작업 중의 매니플레이터의 속도, 다. 2명 이상의 근로자에게 작업을 시킬 경우의 신호방법, 라. 이상을 발견한 경우의 조치, 마. 이상을 발견하여 로봇의 운전을 정지시킨 후 이를 재가동시킬 경우의 조치, 바. 그 밖에 로봇의 예기치 못한 작동 또는 오작동에 의한 위험을 방지하기 위하여 필요한 조치

2. 작업에 종사하고 있는 근로자 또는 그 근로자를 감시하는 사람은 이상을 발견하면 즉시 로봇의 운전을 정지시키기 위한 조치를 할 것

3. 작업을 하고 있는 동안 로봇의 기동스위치 등에 작업 중이라는 표시를 하는 등 작업에 종사하고 있는 근로자가 아닌 사람이 그 스위치 등을 조작할 수 없도록 필요한 조치를 할 것

산업안전보건기준에 관한 규칙 제223조(운전 중 위험 방지)

사업주는 로봇의 운전(제222조에 따른 교시 등을 위한 로봇의 운전과 제224조 단서에 따른 로봇의 운전은 제외한다)으로 인하여 근로자에게 발생할 수 있는 부상 등의 위험을 방지하기 위하여 높이 1.8미터 이상의 울타리(로봇의 가동범위 등을 고려하여 높이로 인한 위험성이 없는 경우에는 높이를 그 이하로 조절할 수 있다)를 설치하여야 하며, 컨베이어 시스템의 설치 등으로 울타리를 설치할 수 없는 일부 구간에 대해서는 안전매트 또는 광전자식 방호장치 등 감응형(感應形) 방호장치를 설치하여야 한다. 다만, 고용노동부장관이 해당 로봇의 안전기준이 「산업표준화법」 제12조에 따른 한국산업표준에서 정하고 있는 안전기준 또는 국제적으로 통용되는 안전기준에 부합한다고 인정하는 경우에는 본문에 따른 조치를 하지 아니할 수 있다.

산업안전보건기준에 관한 규칙 제224조(수리 등 작업 시의 조치 등)

사업주는 로봇의 작동범위에서 해당 로봇의 수리·검사·조정(교시 등에 해당하는 것은 제외한다)·청소·급유 또는 결과에 대한 확인작업을 하는 경우에는 해당 로봇의 운전을 정지함과 동시에 그 작업을 하고 있는 동안 로봇의 기동스위치를 열쇠로 잠근 후 열쇠를 별도 관리하거나 해당 로봇의 기동스위치에 작업 중이란 내용의 표지판을 부착하는 등 해당 작업에 종사하고 있는 근로자가 아닌 사람이 해당 기동스위치를 조작할 수 없도록 필요한 조치를 하여야 한다. 다만, 로봇의 운전 중에 작업을 하지 아니하면 안되는 경우로서 해당 로봇의 예기치 못한 작동 또는 오조작에 의한 위험을 방지하기 위하여 제222조 각 호의 조치를 한 경우에는 그러하지 아니하다.

2.3 산업용 로봇 관련 안전표준

2.3.1 산업용 로봇 관련 KS

1) KS B ISO 10218-1 & KS B ISO 10218-2 [6]

산업용 로봇과 관련된 안전표준은 산업용 로봇 제조자가 지켜야 할 표준으로 산업용 로봇 자체의 안전에 관한 요구사항을 규정하고 있는 ‘ISO 10218-1 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots Part 1 : Robots’이 있다. 또한, 산업용 로봇 시스템의 통합과 산업용 로봇 셀에 관한 안전요구사항을 규정하고 있는 ‘ISO 10218-2 Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots Part 2 : Robot systems and integration’이 있다.

이들 표준은 한국산업표준인 KS로도 기술적인 내용 및 대응 국제표준의 구성을 변경하지 않고 한글로 번역되어 각각 ‘KS B ISO 10218-1 로봇 및 로봇장치-산업용 로봇의 안전에 관한 요구사항-제1부 : 로봇’, ‘KS B ISO 10218-2 로봇 및 로봇장치-산업용 로봇의 안전에 관한 요구사항-제2부 : 로봇 시스템과 통합’으로 제정되어 있다.

특히, 산업용 로봇을 사용하는 사업장에서는 KS B ISO 10218-2에서 담고 있는 내용을 참고하는 것이 매우 필요할 것으로 판단된다. KS B ISO 10218-2에서는 산업용 로봇 및 로봇

시스템 통합과 산업용 로봇 셀에 관한 안전 요구사항을 기술하고 통합은 “산업용 로봇 시스템의 설계, 제작, 설치, 운전, 유지보수, 해체”, “설계, 제조, 설치, 운전, 유지보수와 산업용 로봇 시스템 또는 셀의 해체에 있어 필요한 정보” 그리고 “산업용 로봇 시스템의 요소 장치”를 포함하는 등 산업용 로봇 시스템을 설치하거나 운영하는 통합자 또는 사용자에게 필요한 표준이다. 이 표준은 산업재해 예방과 관련하여 다음과 같은 매우 중요한 사항들을 규정하고 있다.

2) KS B ISO 10218-2 안전 요구사항 [7]

다음 번호는 KS 내에 있는 목차 번호를 그대로 사용하였다.

5.3 설계 및 설치(design and installation)

5.3.1 환경 조건(environmental conditions)

시스템은 주변 온도, 습도 등과 같은 환경 조건을 염두에 두고 설계되어야 한다.

5.3.2 제어기의 위치(location of controls)

자동 운전 동안 접근이 요구되는 운전 제어기와 장비(즉, 용접 제어기, 공압 밸브 등)는 보호 영역 외부에 위치하도록 하여서 제어 구동기를 사용하는 사람이 보호 영역 외부에 있도록 하여야 한다. 제어기와 장비는 로봇 제한 영역이 확실하게 보이는 곳에 위치하고 구성되어야 한다.

5.3.8 로봇 시스템 정지 기능(robot system stopping functions)

5.3.8.1 일반사항

모든 로봇 시스템은 보호정지 및 별도의 비상정지 기능을 가져야 한다. 각 기능들은 추가적인 보호정지 또는 비상정지에 연결이 가능하여야 한다.

5.3.8.2 비상정지 기능(emergence stop function)

동작 또는 기타 위험 기능을 기동할 수 있는 각 제어 스테이션은 KS C IEC 60204-1 및 KS B ISO 13850의 요구사항을 준수하는 수동 기동 비상정지를 가져야 한다.

5.3.9 관련 설비 중단(associated equipment shutdown)

로봇 시스템은 관련 설비의 중단으로 인하여 위험원 또는 위험 조건이 유발되지 않도록 설치되어야 한다.

5.4 로봇 동작 제한(limiting robot motion)

5.4.1 일반사항

로봇 설치의 인력이 위험원에 노출되는 가능성을 감소시키도록 설계되고 통합되어야 한다.

5.4.2 보호영역 및 제한영역의 설정

보호영역은 경계 방호벽에 의하여 설정되어야 한다. 이것은 보호영역 내의 기계 및 위험원의 위치 및 배치를 고려하여 결정되어야 한다.

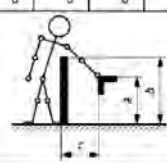
제한영역은 로봇, 말단장치, 고정 장치 그리고 작업 대상물을 둘러싸는 영역을 제한하는 수단에 의하여 설정되는데, 최대 영역보다 작아야 한다. 제한영역은 보호영역 내에 위치하여야 하며, 가급적 운전영역과 가깝게 설정하여야 한다.

3) KS B ISO 13857 (기계안전-인체의 상지와 하지의 위험요인영역 접근을 방지하기 위한 안전거리)

해당 기술표준은 기계류 위험요인 영역에 접근하는 것을 방지하기 위하여 안전거리에 관한 값을 규정한다. 안전거리는 보호용 구조물에 적합하며 하지의 자유로운 접근을 방지하기 위한 거리에 관한 정보도 제공한다.

산안법에 따른 방호벽의 높이는 1,800mm 이상을 요구하고 있으나, 다음 기준에 따른 안전거리를 고려하여 높이로 인한 위험성이 없는 경우 1,400mm 이상으로 할 수 있다.

Dimensions in millimetres

Height of hazard zone ¹ <i>h</i>	Height of protective structure ² <i>h_p</i>									
	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 500	2 700
	Horizontal safety distance to hazard zone, <i>s</i>									
2 700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 600	900	900	700	600	600	500	400	300	100	0
2 400	1 100	1 000	900	800	700	600	400	300	100	0
2 200	1 300	1 200	1 000	900	800	600	400	300	0	0
2 000	1 400	1 300	1 100	900	800	600	400	0	0	0
1 800	1 500	1 400	1 100	900	800	600	0	0	0	0
1 600	1 500	1 400	1 100	900	800	500	0	0	0	0
1 400	1 500	1 400	1 100	900	800	0	0	0	0	0
1 200	1 500	1 400	1 100	900	700	0	0	0	0	0
1 000	1 500	1 400	1 000	800	0	0	0	0	0	0
800	1 500	1 300	900	800	0	0				
600	1 400	1 300	800	0	0	0				
400	1 400	1 200	400	0	0	0				
200	1 200	600	0	0	0	0				
0	1 100	500	0	0	0	0				

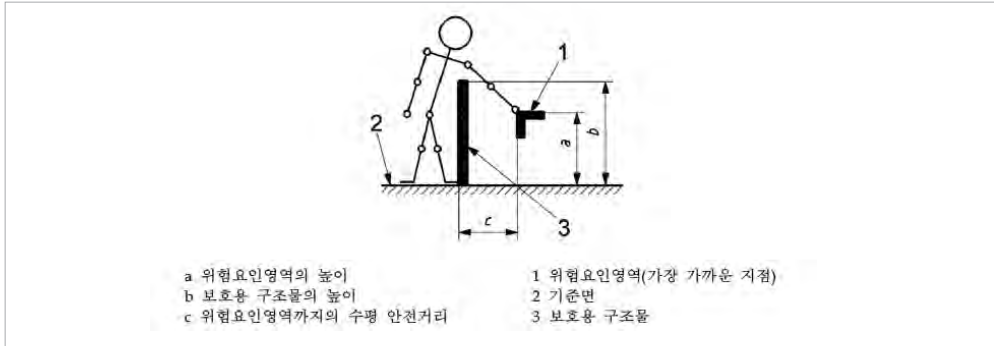


그림 14-2 보호용 구조물에 접근 [10]

4) KS B ISO 13855 (기계안전-신체부위의 접근속도와 관련한 보호설비의 위치선정)

해당 기술표준의 인체부위의 접근속도와 관련한 방호설비의 위치선정에 관한 표준으로 인체부위의 접근속도 값에 기초한 설계변수를 명시하고, 방호설비의 구동장치 또는 감지영역에서 위험요인영역까지의 최소거리를 결정하는 방법을 제시하고 있다.

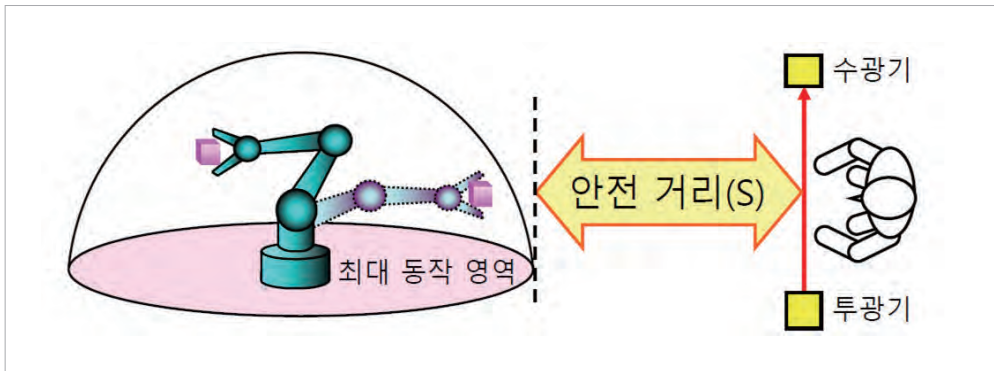


그림 14-3 방호장치와 위험요인영역과의 안전거리 [11]

표 14-8 안전거리 산출 공식

기본 공식		$S = K * T + C$
$d \leq 40\text{mm}$	$100\text{mm} \leq S \leq 500\text{mm}$	$S = (2000\text{mm/s} * T) + 8(d-14\text{mm})$ 손, 손가락 검출 시
	$S > 500\text{mm}$	$S = (1600\text{mm/s} * T) + 8(d-14\text{mm})$ 인체 검출 시
$40\text{mm} < d \leq 70\text{mm}$		$S = (1600\text{mm/s} * T) + 850\text{mm}$ 인체 검출 시
싱글빔 센서		$S = (1600\text{mm/s} * T) + 1200\text{mm}$ 인체 검출 시

감지영역에서 위험요인영역까지의 최소거리는 계산한 값보다 작아서는 안 된다.

$$S = (K \times T) + C$$

여기에서

- S : 최대 동작 영역으로부터 라이트 커튼의 검출 영역까지의 최소거리(mm)
- K : 2000mm/s (인체의 전부나 일부의 접근속도 데이터에서 얻어지는 파라미터(mm/s))
- T : 전체 시스템의 정지성능(s)
- C : 침범거리(mm), $C=8(d-14)$, 0보다는 작을 수 없다.
- d : 장치의 센서 감지능력(mm)

이 값을 $S = (K \times T) + C$ 에 대입하면 다음과 같다.

$$S = (2000 \times T) + 8(d-14)$$

앞선 식은 500mm이하의 모든 최소거리에 적용된다. S값의 최솟값은 100mm이다.

$S = (2000 \times T) + 8(d-14)$ 를 이용하여 계산된 S값이 500mm를 초과하는 경우, 다음 식을 사용한다. 이 경우 S값의 최솟값은 500mm이다.

$$S = (1600 \times T) + 8(d-14)$$

※ 계산 예) 어떤 기계의 정지시간이 60ms(t2)이다. 감지능력 14mm에 응답시간 30ms(t1)인 수직 광전자식 방호장치를 갖춘 전자감지식 방호장치가 설치되어 있는 경우

$$S = (2000 \times T) + 8(d-14)$$

$$T = 90\text{ms} = 0.09\text{s}, d = 14\text{mm}$$

$$\text{따라서 } S = (2000 \times 0.09) + 8(14-14) = 180\text{mm이다.}$$

산업용 로봇에 대한 이러한 안전기준들을 지키는 것과 동시에 유해·위험요인을 조사하여 사고를 미연에 방지하는 것은 매우 중요하다.

참고문헌

- [1] 조흥학, 산업안전보건법 해설, 신광문화사, 2020.
- [2] 산업안전보건공단, 산업재해통계, 2011-2015.
- [3] 산업안전보건법·령·시행규칙 및 산업안전보건기준에 관한 규칙, 2020.
- [4] 산업안전보건공단, “로봇, 정전기 중대재해사례 모음집”, 2009.
- [5] 중소벤처기업부, 한국로봇산업진흥원, 한국로봇산업협회, “2019년도 로봇 안전검사 및 안전인증 지원사업”, 2019.
- [6] 이영석, 산업용 로봇 재해사례 분석을 통한 안전성 향상 및 제도 개선 방안 연구, 울산대학교, 공학석사학위논문, 2019.
- [7] KS B ISO 10218-2 로봇 및 로봇장치-산업용 로봇의 안전에 관한 요구사항-제2부:로봇 시스템 및 통합, 2017.
- [8] KS B ISO 8373 로봇 및 로봇 장치-용어. 2015
- [9] 여현옥, 자동화설비(산업용로봇) 설치 등 안전사고 예방 대책 연구, 안전보건공단 산업안전보건연구원, 2016.
- [10] KS B ISO13857, 기계류의 안전성-인체의 상지와 하지의 위험요인영역 접근을 방지하기 위한 안전거리, e나라표준인증, 2010
- [11] 임영명, 산업용 로봇 안전방호대책 어플리케이션 소개, 한국 오픈론 제어기기, 2019. (<http://www.korearobot.or.kr/wp/wp-content/uploads/2019>)

AI로봇기반

인간-기계협업기술 개론

초판 2쇄 2022년 12월 2일

지은이 임성수·엄주명·황효석·김대근·송지현·양정연·문형필·구자춘·김종현·최혁렬·황성호
박교식·김희철·박민수·전진우

발행인 강신원

발행처 어나더스쿨

출판신고 2021년 1월 28일 제2021-000014호

주소 경기도 용인시 수지구 상현로 30-10, 4804-1701

이메일 pub@anotherschool.kr

편집 강신원

디자인 황인옥

검토 양운제·유철원·조영훈·이경준·강선정·박상유·정성윤

ISBN 979-11-976094-0-4

이 책은 저작권법에 따라 보호받는 저작물이므로 무단 전재와 무단 복제를 금지하며, 이 책 내용의 전부 또는 일부를 이용하려면 반드시 저작권자와 어나더스쿨의 서면 동의를 받아야 합니다.

어나더스쿨

이 콘텐츠는 도서출판 어나더스쿨이 제작하여
전자 데이터로 재발행한 것입니다.

전자책 초 판 발행 2021년 12월 30일
전자책 최신판 발행 2022년 12월 2일
전자책 ISBN 979-11-976094-1-1

AI로봇기반 인간-기계협업기술 개론

- :: Chapter 1 인간-기계협업기술 개요
- :: Chapter 2 산업 프로세스와 산업 지능
- :: Chapter 3 인공지능과 기계학습
- :: Chapter 4 스마트 생산
- :: Chapter 5 안전협동로봇
- :: Chapter 6 로봇 그리퍼와 파지 조작 기술
- :: Chapter 7 인간-로봇 상호작용
- :: Chapter 8 융합안전기술
- :: Chapter 9 산업용 로봇 안전
- :: Chapter 10 비전 및 인식 지능
- :: Chapter 11 협동 로봇 안전 요구조건 및 안전 제어
- :: Chapter 12 이동 로봇
- :: Chapter 13 네트워크 통신 및 시스템 통합 프로그래밍
- :: Chapter 14 안전표준과 인증