



융합연구리뷰

Convergence Research Review

융합기술

인간과 로봇의 공존을 위한 융합기술 동향

이인호(부산대학교 전기전자공학부)

융합정책

데이터 과학 기반 미래유망 융합연구 분야 발굴 방법과 사례

미래융합전략센터 데이터분석팀

CONTENTS

01 편집자주

03 인간과 로봇의 공존을 위한 융합기술 동향

17 데이터 과학 기반 미래유망 융합연구 분야 발굴 방법과 사례

융합연구리뷰

Convergence Research Review

2024 October Vol.10 No.10

발행일 2024년 10월 23일

발행인 임혜원

발행처 한국과학기술연구원 미래융합전략센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4987 | <https://kist.re.kr/fcsc>

펴낸곳 공간기획 Tel. 044-863-0978

편집자주

현대 기술 진화의 주인공 로봇: 인간과의 공존을 위하여

테슬라의 Optimus는 인간과 유사한 외형과 능력을 갖춘 로봇으로, 인간을 대신하여 반복적이고 위험한 작업을 수행할 수 있는 능력을 갖췄다. 보스턴다이나믹스의 이족 보행 로봇 Atlas와 사족보행 로봇인 Spot은 복잡한 환경을 탐색하고 장애물을 극복할 수 있는 능력을 지녀, 다양한 산업 분야에서 활용될 수 있는 다목적 로봇이다.

이러한 로봇들이 보여주는 가능성은 단순한 기술의 진보를 넘어서, 우리의 일상과 산업 구조에 지대한 영향을 미칠 것이다. 무엇보다 로봇은 인공지능, 자율주행, 센서 기술 등 다양한 분야에서의 융합이 활발하게 일어나는 분야이다.

본 호 기술리뷰에서는 인간과 로봇의 공존을 위한 융합기술을 다룬다. 로봇 연구 선진국의 핵심 로봇들을 소개할 뿐만 아니라, 이미 세계에서 로봇 기술의 경쟁력을 공고히 한 우리나라 연구팀의 로봇들과 이를 실현한 기술들을 소개한다.

'도전적·미개척' 융합연구 주제 발굴... 데이터 "만능 해법"

데이터 과학이 현대 연구의 모든 단계에 깊숙이 자리잡고 있는 지금, 융합연구는 새로운 지평을 열 수 있는 기로에 서 있다. 과학 출판물, 특히, 기술 동향을 분석하는 데이터 과학의 활용은 연구 주제 발굴과 정책 수립의 패러다임을 전환하였다. 그러나 이러한 접근 방식이 아직 초기 단계에 머물러 있어, 실질적 활용을 위해서는 보다 깊은 고민이 필요하다.

본 호 정책리뷰에서는 데이터 과학이 융합연구의 기획 과정에서 어떻게 신뢰성과 정확성을 높일 수 있는지를 탐구한다. 다양한 학문적 데이터를 통합해 연구 분야의 효율적 발굴을 지원하는 과정은, 앞으로의 연구 기획에 미치는 영향과 그 잠재력을 여실히 드러낼 것이다.

이제껏 발견하지 못한 융합 미개척 영역, 데이터 과학이 곧 그 가려운 곳을 긁어줄 것이다.



융합연구리뷰
Convergence Research Review

2024 October Vol. 10

No. 10



융합기술

인간과 로봇의 공존을 위한 융합기술 동향

이 인 호

부산대학교 전기전자공학부 교수

인간과 로봇의 공존을 위한 융합기술 동향

이 인 호 (부산대학교 전기전자공학부 교수)

I. 서론

전기자동차 회사로 잘 알려진 미국 기업 Tesla가 2023년 12월 2세대 Optimus 모델을 공개하였다. 같은 해 5월에 공개한 1세대 Optimus와 비교하여 향상된 보행속도, 가벼운 무게, 11 자유도의 손, 그리고 자체 개발한 구동기 및 센서를 탑재하였다. 2022년 AI Day에서 휴머노이드 로봇을 개발하겠다고 선언한 지 1년 조금 지난 시간 동안의 발전이었다. 2024년 3월 FigureAI는 CTO인 Dr. Jerry Pratt를 필두로 Tesla의 Optimus 로봇과 버금가는 시스템 하드웨어 수준과 보행, 그리고 거대언어모델을 탑재하여 Speech-to-Speech 데모를 공개하였다. 공개된 데모는 휴머노이드 시스템이 평지나 험지에 대한 보행(Locomotion)이나 주어진 임무를 위한 조작(Manipulation)을 할 수 있음에 그치지 않고, 인간과 소통하며 하나의 독립된 객체로서의 시스템이 될 수 있다는 가능성을 보였기에 산업계/학계에 전해진 Impact가 매우 컸다고 평가받는다.

최근 로봇 산업계에서는 Tesla의 자체 휴머노이드 로봇 개발에의 투자, BMW의 FigureAI 9000억 규모 투자, Mercedes-Benz의 Apptronik 투자, 1x Technology의 1300억 규모 투자유치 등 활발한 자금의 흐름이 알려져 있다. 중국 역시 Unitree, Ubitech, Astribot 등 여러 회사에서 거의 매달 새로운 휴머노이드 로봇 시스템을 번갈아 공개하고 있다.

선진국들은 노동력 감소로 인한 생산성 저하 우려를 로봇 시스템을 통한 자동화로 해결하였다. 공장이나 제어된 환경 외에도 인간이 활동하는 환경에서의 로봇 시스템 활용을 위해 인간의 형상을 가진 휴머노이드 로봇의 수요가 기대되고 있어 산업계를 중심으로 활발한 움직임을 보인다. 휴머노이드 로봇 뿐 아니라 배달 로봇, 순찰 로봇, 입는 로봇, 바이오 로봇 등 로봇 기술은 다양한 분야에 접목되어 다양한 기능을 보이며 우리 생활 깊숙이 들어오려 한다. 본문에서는 필자가 목도해 온 다양한 휴머노이드 로봇 개발 프로젝트들을 중심으로 휴머노이드 로봇의 기술 동향을 서술한다.

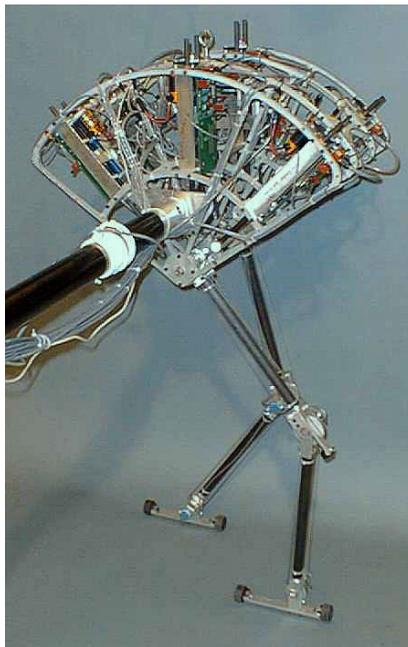
II. 국가별 휴머노이드 로봇의 변천사

1. 미국

1996년 MIT 박사과정 Jerry Pratt은 Spring Flamingo (그림 1) 로봇을 공개하였다. Passive Walker라는 중력을 활용하여 보행하는 당시의 로봇들과 비교하여 Flamingo 로봇은 자신의 힘을 활용하여 걷는 미국 내 최초의 족형 로봇으로서 Jerry Pratt이 제안한 Capture Point를 성공적으로 증명한 사례이다. 이후 Capture Point 개념은 Boston Dynamics의 BigDog, Atlas 로봇 등의 보행 제어에 핵심적인 기여를 한다.

Boston Dynamics는 Dr. Marc Raibert가 1992년 설립한 로봇 회사이며 그는 MIT와 CMU에서 교수로서 재직할 바 있었다. 얼음판 위에서 미끄러짐을 극복하며 보행하고 발로 차는 외력에도 순응하는 BigDog의 퍼포먼스는 이족보행 및 사족보행을 연구하는 연구자들에게 깊은 영감을 주었다. 유압 구동기를 활용하여 폭발적인 힘을 내며 기계공학이 로봇으로 선보일 수 있는 극한의 운동능력을 보이는 Atlas 로봇 역시 산업계와 학계에 큰 임팩트를 주었다. Boston Dynamics는 Google, Softbank, Hyundai Motors 순으로 인수가 되면서 로봇 연구의 선도 주자의 자리를 지키고 있다. 이외에도 미국 내에서는 IHMC(The Institute for Human and Machine Cognition)의 M2V2, NASA JSC의 Valkyrie, Agility Robotics의 Digit, Virginia Tech의 CHARLI 등 휴머노이드 시스템들이 개발되었으며 연구소/스타트업/대학교 연구소 레벨에서 비교적 크지 않은 규모의 연구비와 인력으로 족형 로봇 연구가 조용히 진행되고 있었다.

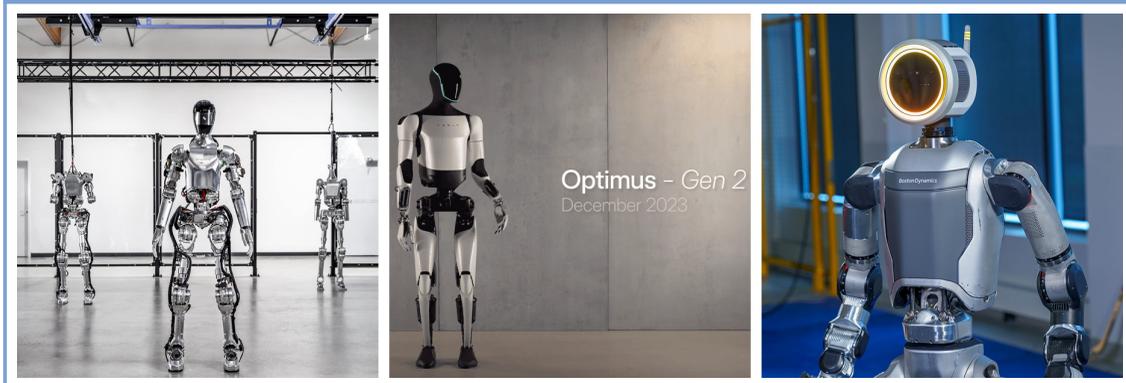
그림 1. MIT Flamingo 로봇(Dr. Jerry Pratt 개발)



* 출처: Robotics Today

2013년, 2015년 두 번에 걸쳐 진행된 DARPA 주관 DARPA Robotics Challenge 이 후 주요 로봇 요소기술의 발전에 힘입어 2020년 이후 아주 많은 수의 로봇들이 미국에서도 공개되고 있다(그림 2). 완성 전기자동차를 제작하던 Tesla는 기 보유한 전기 모터 제작 및 제어 기술을 접목하여 Optimus 휴머노이드 로봇을 개발하고 있고, FigureAI는 거대언어모델을 탑재하여 양방향 소통이 가능한 휴머노이드 로봇을 개발하였고 이후 BMW의 9000억 규모를 받아 Tesla 만큼 기대 받는 기업으로 성장하고 있다. FigureAI의 접근 이후 아주 많은 로봇 연구/개발팀 들이 거대언어모델을 융합한 다양한 시도를 영상, 논문 등으로 공개하고 있다. 높은 자유도 만큼이나 다양한 임무와 역할을 수행할 수 있다는 휴머노이드의 장점으로, 거대언어모델 탑재를 활용한 인간과의 다양한 소통으로 기존 태블릿이나 명령어를 활용한 운영의 단점을 크게 보완할 것으로 기대한다. 게다가 후술할 구동기 및 강화학습 등의 주요 로봇 요소기술의 발전으로 하드웨어·소프트웨어 양측면에서 로봇 연구자들의 생산성이 가시적으로 향상되었다고 평가받는다.

그림 2. 미국 휴머노이드 로봇



* 출처: 좌: Figure AI, 중: Tesla, 우: Boston Dynamics

2. 일본

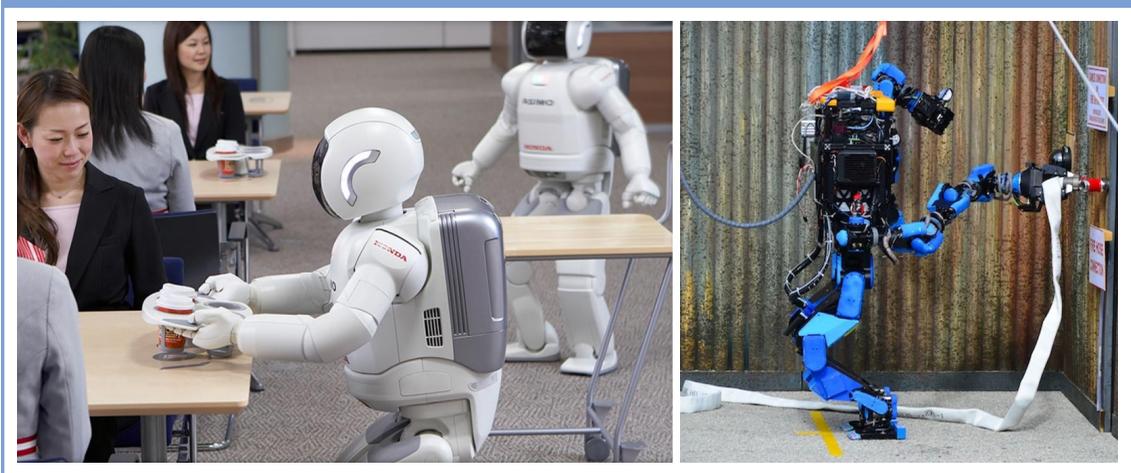
글로벌 자동차 기업 혼다가 개발하여 2000년 공개한 아시모(ASIMO)는 휴머노이드 로봇의 상징으로 자리 잡으며 로봇 공학 발전과 영감에 중요한 기여를 한 로봇이다(그림 3-좌). 아시모의 역사는 1980년대 후반부터 시작된 혼다의 로봇 개발 프로젝트에서 출발하였다. 1986년부터 1993년까지의 E시리즈 개발은 인간과 같은 보행 능력을 갖는 로봇 시스템 개발을 목표로 하였다. E0부터 E6까지 다양한 모델이 개발되었고 E6에서 세계 최초로 안정적인 이족 보행을 구현하였다. 이후 1996년까지 진행된 P시리즈 프로젝트는 두 팔과 두 다리를 가지는 완전한 휴머노이드 형태를 가지도록 설계되었고 130kg의 무게를 가졌다. 기계공학의 발전과 설계의 최적화 과정을 통해 2000년에는 공식적으로 알려진 아시모가 키 130cm, 52kg의 무게를 가지고 완성되었다. Advanced Step in Innovative Mobility의 약자로서 ASIMO라는 모델명으로 발표되었다. 이후 2005년, 2007년, 2011년 각각 점프와 달리기와 같은 향상된 이동 능력, 음료를 배달하는 조작 능력, 인공지능과 다중 센서 시스템 탑재로 예측 반응, 음성 인식 등 지능적인 운용을 선보였다. 하지만 2018년 혼다는 아시모의 개발 중단을

발표하였고 아시모 개발 중 남겨진 노하우들은 자율주행차, 헬스케어 로봇 등 다른 프로젝트에 활용되고 있다.

일본 도쿄대학 출신 연구자들이 설립한 SCHAFT는 2013 DARPA Robotics Challenge Trials에 출전하여 압도적인 성능으로 1위를 차지하였다(그림 3-우). 평지 보행, 사다리 등반, 험지 보행 등 이동 능력에서 타 참가팀과 비교할 수 없는 수준을 보였고 문 열기, 밸브 조작, 파이프 연결 등과 같은 조작 능력에서도 최고 수준을 선보였다. 모든 관절이 전기 구동방식으로 작동하였으며 독자적인 액추에이터 기술을 통해 높은 출력을 구현했다. 특히 모터를 CPU 오버클럭과 비슷한 방식으로 최고 성능을 끌어올리는 접근법은 기존 로봇 연구자들에게 큰 임팩트를 남겼다. 이후 구글에서 SCHAFT 팀을 인수하였고 구글의 DARPA 정부자금 지원을 받지 않겠다는 방침으로 인해 2015년 DARPA Robotics Challenge 결선에는 참가하지 않았다. 구글은 2017년 로봇 사업 전략을 재정비하며 SCHAFT 프로젝트는 축소되다가 2018년 공식적으로 중단하였다.

이와 같이 일본 내 휴머노이드 로봇의 개발 흐름은 세계 어느 나라보다 빠르고 선도하는 자리를 지켰지만 2018년 대부분 종료되었다. 대학 연구소, 국가 연구소 레벨에서 작게나마 그 흐름을 유지하고 있다.

그림 3. 일본 휴머노이드 로봇



* 출처: 좌: Honda, 우: SCHAFT

3. 한국

2004년 KAIST 기계공학부 오준호 교수는 KHR-3을 공개하였다. KHR은 Korea Humanoid Robot의 약자로서 KHR-1은 몸통 및 하체만을 가진, KHR-2는 사지와 머리를 갖춘 휴머노이드 로봇 형태, 그리고 KHR-3는 경량 설계 및 이동 성능을 보강하여 개발되었다. 대한민국 최초의 보행 로봇 및 휴머노이드 로봇으로서 의미를 가진다. 이후 알베르트 아인슈타인의 얼굴을 장착한 알베르트 휴보를 개발하여 2005년 APEC에서 공개하여 큰 반응을 이끌었다. 2009년에는 최적 설계를 통해 45kg로 가벼워진 무게로 휴보 2에는(그림 4-좌상) 달리는 운동능력이 추가되었다. 많은 사람들이 상상하는 사람과 같은 달리기의 수준은 아니었으나 전기 모터를 활용하여 자기 체중을 이기며 두 다리가 떠 있을 수 있음을 보여주었다는 것에 의의가 있다. 이후 2013년 2015년 진행된

DARPA Robotics Challenge 참가를 위해 팔과 다리를 개량한 DRC-HUBO, DRC-HUBO+가(그림 4-좌하) 개발되었다. 특히 2015년 가장 짧은 시간동안 8개의 임무를 모두 수행하여 우승을 차지하고 상금 2백만 달러를 획득하였다. 이후 후보의 기술들은 보다 산업계에 효용성이 있는 협동로봇, 사족보행로봇, 배달로봇 등에 적용되며 레인보우로보틱스 하에 지속적인 발전이 진행되고 있다.

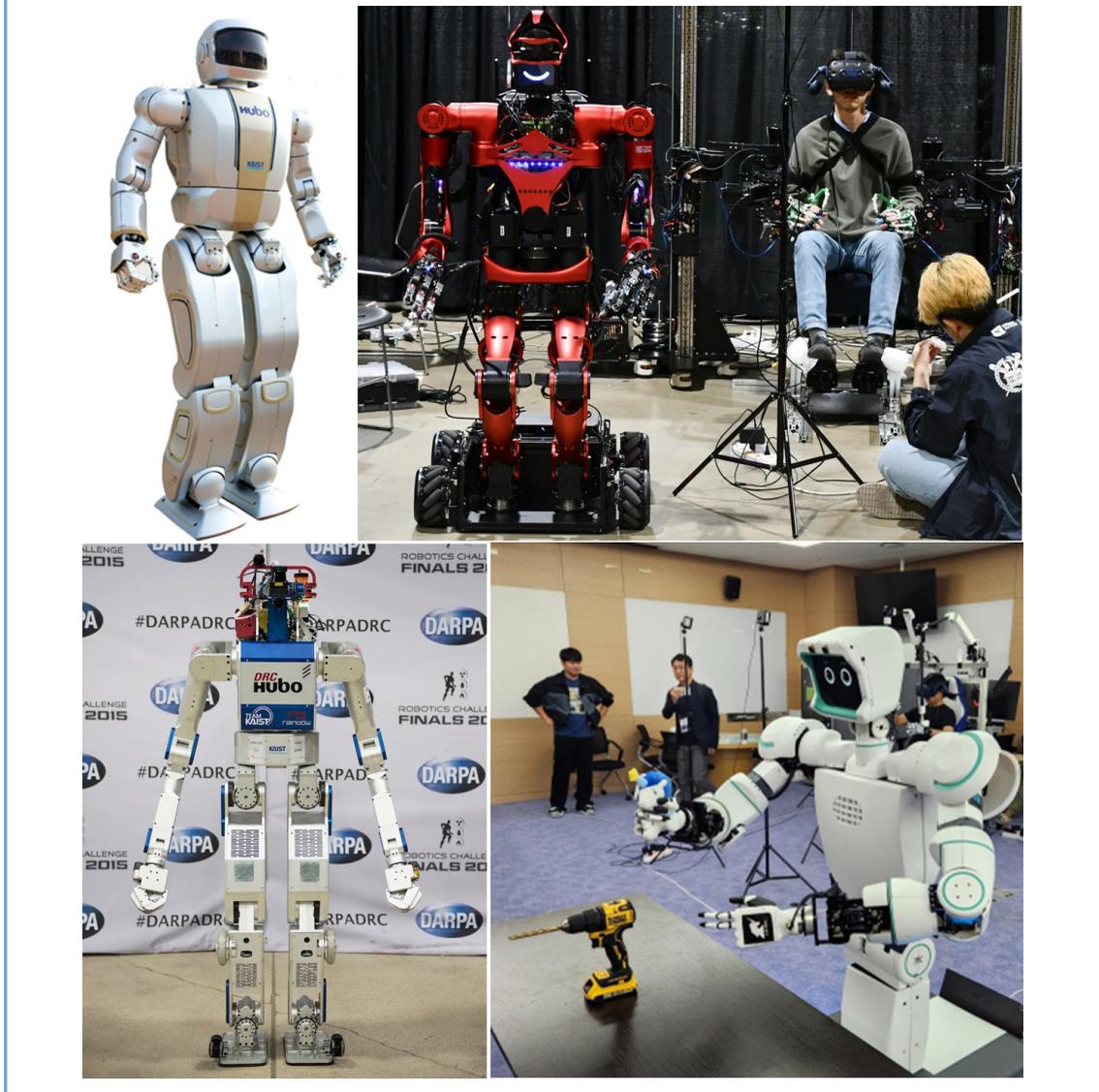
한국 연구자들 역시 미국/일본/중국/유럽/홍콩과 마찬가지로 DARPA Robotics Challenge에 출전하였다. 대학 연구소는 서울대학교, KAIST가 출전하였으며 기업은 로보티즈가 출전하였다. 총 3팀은 각각 12위, 1위, 15위를 차지하였다(2015 Finals 기준). 한국의 휴머노이드 로봇 기술이 세계적 수준으로 도약한 것이다. 2004년-2005년 DARPA Grand Challenge를 경험한 많은 연구자들이 Google, Tesla, OpenAI, Microsoft, Waymo 등에서 자율주행차 발전에 크게 기여하고 있듯, DARPA Robotics Challenge를 경험한 많은 한국인 연구자들이 대한민국 휴머노이드 역량 향상에 기여할 것으로 기대된다.

한국의 세계 수준의 로봇 경연대회에서의 성취는 DARPA Robotics Challenge에 그치지 않고 Xprize Avatar 대회에서도 이어진다. Robotics Challenge에도 참가하였던 서울대학교 박재흥 교수팀(TEAM SNU) 전신 원격조종 시스템 TOCABI를(그림 4-우상) 공개하였고, UNIST 배준범 교수팀(TEAM UNIST) Xprize Avatar 대회에서 6위를 차지하며 아시아 국가들 중 최고 성적을 받았다. Xprize Avatar 대회는 개발진이 운영하는 것이 아닌 시스템을 처음 경험하는 제 3자가 로봇을 운용하는 규칙이 존재하여, DARPA Robotics Challenge보다 더 향상된 조작능력을 요구한다. 이러한 규칙 속에서도 우수한 성적을 내었다는 것은 우리나라의 로봇 기술이 운용의 일반성을 확보하였다는 것을 시사한다. 사람마다 상이한 시점 또는 사물에 접근하는 방식을 멀미감이나 이질감 없이 기술을 실현하는 것이 미래 로봇의 핵심 기술이기 때문이다.

2020년, 대학 연구소 및 정부 출연 연구소 중심의 휴머노이드 로봇 연구 기조에 변화를 일으킨 일이 일어났다. 현대자동차가 Boston Dynamics를 인수한 것이다. Boston Dynamics는 휴머노이드 로봇 Atlas뿐만 아니라 사족 보행 로봇 Spot을 보유하고 있으며, 이들 로봇의 기술 수준은 세계의 어떤 팀도 쉽게 넘보기 어려운 수준이다. 이에 따라 Boston Dynamics의 기술을 활용한 시장 개척이 매우 기대되는 상황으로, 명실상부 최고의 로봇 연구팀으로 자리매김하고 있다. 이후 2023년, LIG넥스원이 군용 사족 보행 로봇 개발사인 미국 Ghost Robotics를 인수하며 대한민국의 로봇 개발 환경에 큰 변화를 가져왔다. KAIST의 후보 개발진이 설립한 레인보우로보틱스도 산업적인 수요에 맞춘 사족 보행 로봇을 공개하였고, ETH를 거쳐 KAIST 기계공학부에서 재직 중인 황보제민 교수는 사족 보행 로봇 스타트업 라이온로보틱스를 설립하였다. 이로 인해 대한민국은 사족 보행 로봇의 전국시대에 접어든 것으로 보인다.

세계 최고 수준의 Boston Dynamics의 Spot을 비롯하여, Ghost Robotics의 Vision60(높은 방수/방진 성능을 갖춘 군용 장비), DARPA Robotics Challenge에서 우승한 레인보우로보틱스의 RBQ-10, 강화학습을 활용한 사족 보행 로봇 제어의 개척자인 라이온로보틱스의 라이보2 등 다양한 기업들이 하드웨어와 소프트웨어 각각의 강점을 살려 사족 보행 로봇 시장에서 경쟁하고 있다. 이러한 흐름은 대한민국의 로봇 개발 주체들이 다각적으로 생겨나고 있음을 잘 보여준다.

그림 4. 한국 휴머노이드 로봇



* 출처: 좌상: 카이스트신문 (2011), 우상: IEEE Sepctrum (2015), 좌하: 서울경제 (2023), 우하: IEEE Sepctrum (2023)

대한민국은 인접한 국가인 일본에 비하여 조금 늦은 휴머노이드 로봇 개발을 시작하였으나 KIST의 MAHRU, UNIST의 Avatar, 서울대학교의 TOCABI 등 휴머노이드 개발이 끊임없이 이루어지고 있으며 산업계의 수요가 있는 사족 보행 로봇에 있어 세계 최고 수준의 팀들이 경쟁을 하고 있다. 저출산/고령화에 대비하여 물리적 임무수행이 가능한 로봇의 사회적 수요에 맞추어 대한민국은 학계/산업계가 서로의 장단점을 보완하며 성장하고 있다. 미국과 견줄만한, 혹은 이상이라 평가 받는 인접국가 중국과의 경쟁은 후술하도록 한다.

III. 로봇 연구개발의 전환점

1. DARPA Robotics Challenge

미국, 일본, 한국의 휴머노이드 로봇 연구 변천사를 살펴보면 공통적으로 등장하는 중요한 이벤트가 DARPA Robotics Challenge이다. 이 대회가 로봇 연구자들이 공통적으로 언급하는 연구개발의 전환점이 된 이유는 다음과 같다.

2011년 후쿠시마 원전 사고 당시, 로봇 강국으로 알려진 일본조차도 로봇을 활용한 물리적 대응에 실패하면서 학계와 산업계에서는 로봇 기술과 시스템의 효용성에 대한 의문이 제기되었다. 이로 인해 재난 상황에서 로봇의 역할이 명확히 정의될 필요성이 대두되었고, DARPA는 이러한 필요를 반영하여 후쿠시마 원전 당시 최소한으로 요구되는 로봇의 임무를 제안하였다. 그 결과, DARPA Robotics Challenge가 2013년과 2015년에 걸쳐 진행되었으며, 이는 로봇 기술의 발전 방향에 중대한 영향을 미쳤다.

DARPA Robotics Challenge에는 미국, 일본, 유럽, 중국, 홍콩, 한국의 대학 연구실, 정부 출연 연구소, 기업 등이 참여하였다(2013 Trials 13팀, 2015 Finals 25팀). 2013 Trials에서는 8개의 임무를 각각 1시간 내에 수행하는 것이 목표였으며, 2015 Finals에서는 모든 임무를 포함하여 1시간 내 수행하는 것이 요구되었다. 임무 내용은 운전, 문 열기, 밸브 조작, 벽 뚫기, 험지 이동, 장애물 치우기, 계단 이동, 미공개 임무(예: 파이프 연결, 비상 스위치 조작 등)로 다양했다. 통신 중단, 대역폭 제한, 지연 시간 등의 제한 요소가 있었음에도 불구하고, 2015년에는 3팀이 1시간 내 모든 임무를 성공적으로 수행했으며, 많은 팀이 가능한 모든 임무를 수행하는 성과를 거두었다.

DARPA Robotics Challenge는 그 결과와 수상 여부와 관계없이 많은 로봇 연구자들이 실험실 내 실험을 넘어 실제 환경에서의 성과를 목표로 삼게끔 유도했다는 긍정적인 평가를 받고 있다. 실제로 알고리즘과 소프트웨어에 집중하던 로봇 연구자들은 하드웨어와의 통합을 통해 실제 문제 해결에 나서기 시작했고, 이로 인해 하드웨어 기술 수준도 향상되었다. 2018년 이후에는 세계 각지에서 새로운 휴머노이드 로봇과 족형 로봇이 폭발적으로 공개되고 있다.

그러나 이러한 긍정적인 평가와 함께 미국 내에서는 한동안 “인간형 로봇”, 즉 휴머노이드 로봇의 효용성에 대한 의문도 제기되었다. 인간의 생활 환경은 인간의 편의를 위해 설계된 다양한 구조와 도구로 이루어져 있어, 휴머노이드 로봇에 대한 기대가 컸으나, 기존 기술들이 실용화에는 부족하다는 결론이 나타났다. DARPA Robotics Challenge 이후 주요 연구 자금이 휴머노이드 로봇 연구로 유입되지 않는 경향도 있었던 것이다.

하지만 후속 기술의 발전과 함께 대기업들이 휴머노이드 개발에 뛰어들면서, 한동안 침체기를 겪었던 휴머노이드 로봇은 다시금 주목받고 있다.

2. Quasi-Direct-Drive Motor(Cheetah Robot)

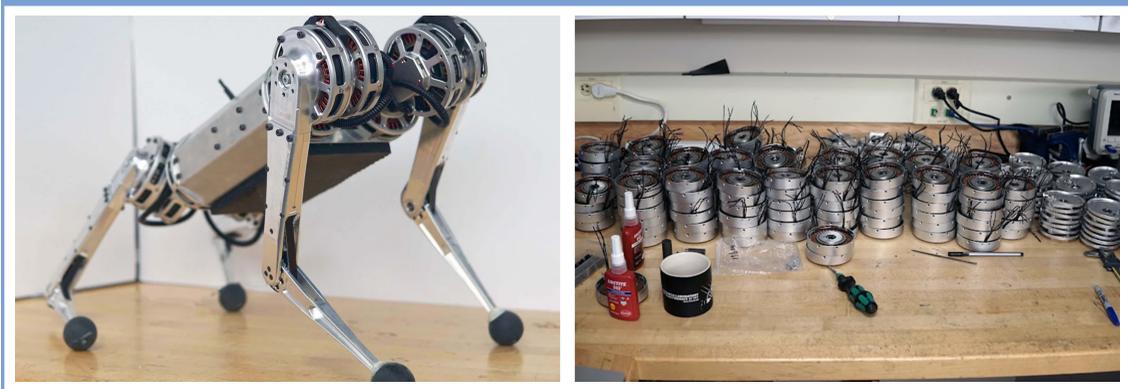
MIT 기계공학부에 재직 중이던 김상배 교수는 Cheetah 로봇과 Mini Cheetah 로봇으로 Quasi-Direct-Drive 모터(그림 5) 활용하여 3.0 m/s 이상의 민첩성 높은 이동 능력을 선보였다. 9kg의 작은 무게와 소형 로봇임에도 강한 힘과 민첩한 움직임을 보여주었다. 특히 다리의 관성을 낮추기 위해 로봇 자중의 상당 지분을 차지하는 모터를 몸통 가운데로 위치 시켰으며 구동기의 개발과 힘제를 활용한 민첩한 움직임이 로봇의 핵심 기술이었다.

김상배 교수가 제안한 구동기는 힘 제어(토크 제어)에 최적화된 구조를 가지고 있으며, 환경과의 상호작용에 유리한 특징을 지니고 있다. 이 구동기는 “Proprioceptive 구동기”로 불리며, 기존의 고속 모터와 고-기어비 감속기를 포함한 형태와는 달리, 저-기어비의 감속기를 부착한 Pancake 형태로 설계되었다. 특히 이 구동기는 속도가 느리지만 고밀도의 토크를 출력할 수 있도록 납작하고 넓은 반경을 가진 것이 특징이다. 이는 마치 콜럼버스의 계란과 같이 누구나 생각할 수 있지만, 그동안 시도되지 않았던 혁신적인 접근이다.

이 구동기는 전기 모터가 가진 “높은 토크를 생성하지 못해 힘 제어가 어렵다”는 한계를 극복하며, 높은 출력값을 제공하는 유압 구동기와 비슷한 성능을 기대할 수 있게 했다. 그러나 높은 출력값을 가진 유압 구동기의 장점에도 불구하고, 시스템 구성이 어렵고 소음 및 위험성을 동반하는 단점이 있다.

실제로 2022년부터 유압 구동기로 유명한 Boston Dynamics는 유압 구동기를 활용한 Atlas 로봇 개발을 중단하고, 2024년에는 완전한 은퇴를 선언하며 새로운 전기 모터 기반의 Atlas 로봇을 공개할 예정이다.

그림 5. Quasi-Direct-Drive Motor(우)의 첫 로봇 적용 사례



* 출처: 좌: IEEE Sepctrum (2019), 우: Ben Katz Blog (2019)

Quasi-Direct-Drive 모터 개발 이후 수많은 연구팀에서 다양한 로봇 플랫폼들을 공개하고 있다. 코로나 시즌이 끝날 무렵부터는 한 달에 한두 개의 새로운 로봇 플랫폼들이 선보여지기 시작했으며 토크 제어에 용이하다는 장점을 활용해 민첩한 움직임을 가지는 퍼포먼스를 공통적으로 보인다. 보행(Locomotion) 이란 지면 혹은 환경에 힘을 발휘하여 나의 몸의 상태를 제어하는 것이며 조작(Manipulation) 이란 대상 물체에 힘을 발휘하여 물체의 상태를 제어하는 것으로 생각할 수 있는데, 토크 제어가 잘 된다는 것은 물체나 환경에 가할 수 있는 입력

힘이 위치에 의한 힘 발생이 아니라 순수 힘을 제어하는 것이기 때문에 가속도 레벨에서의 부드럽고 폭발적인 힘의 변화를 줄 수 있다는 장점을 가져온다. 추가적으로 저-기어비를 가지기 때문에 별도의 센서 없이도 접촉을 예측할 수 있도록 관측기 설계 또한 용이하여 하드웨어적 측면에서 많은 변화를 일으켰다. 또한 시뮬레이션 환경에서 개발되고 있던 수많은 알고리즘과 방법론들을 실제 시스템에 비교적 큰 차이 없이 적용할 수 있다는 이점까지 가져왔기에 휴머노이드 로봇 외에도 많은 로봇 Application에 혁명적인 변화를 가져왔다 평가받는다.

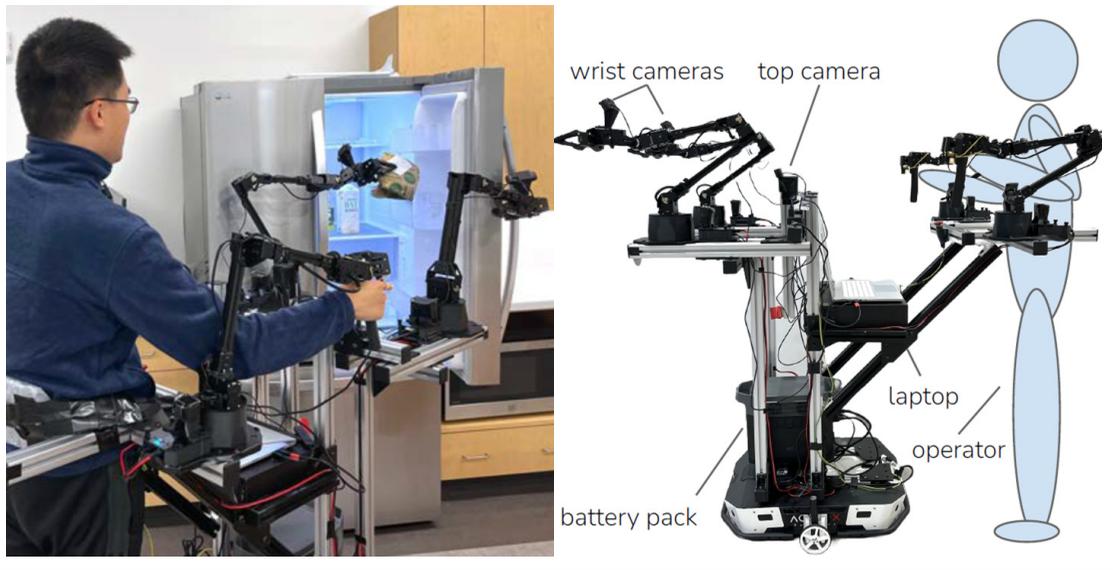
3. 강화학습(Reinforcement Learning)

Quasi-Direct-Drive의 등장으로 하드웨어에 대한 진입장벽이 낮아지고 고속/고출력의 관절을 구성할 수 있게 되면서 많은 로봇 시스템들이 공개되고 있다. 이러한 하드웨어적 측면에서의 발전은 그동안 제안되고 수학적으로 검증 되어왔던 수많은 최적 제어들을 시스템에 적용하여 효용성을 확인할 수 있게 되었다. 비단 구동기뿐 아니라 센서에서도 많은 변화와 발전이 있었다. Force/Torque 센서, Inertia Measurement Unit(IMU) 등 대표적으로 휴머노이드 로봇에 활용되고 있던 센서들도 가시적인 발전이 있었다.

소프트웨어적 측면에서도 많은 변화가 있었다. 2016년 AlphaGo의 등장을 보고 머지않은 미래에 강화학습이 로봇 시스템에도 적용될 것이라는 그리 어렵지 않은 예측이 있었다. 2024년 Stanford University에서는 Mobile ALOHA라는 시스템과 논문을 발표하였다(그림 6). 강화학습은 아주 많은 데이터에 의존하기 때문에 이미지, 영상, 언어 등과 같이 비교적 소프트웨어상에서 쉽게 취득할 수 있는 경우와 달리 로봇의 경우 실제 데이터로 학습을 진행하기 어려운 점이 있었다. 대부분의 로봇을 위한 강화학습은 가상환경(시뮬레이션)에서 실제와 유사하고 다양한 환경속에서 데이터를 미리 취득하게 한 후 이를 Sim2Real, 가상환경에서 실제환경으로의 Domain Adaptation을 통해 적용하는 것이 일반적인 Pipeline이었다. 보행(Locomotion)은 비교적 단순히 자신의 상태(State)를 원하는 방향으로 제어하는 것이기 때문에 난이도가 높지 않았다. 하지만 조작(Manipulation)의 경우 물체의 상태(State)를 변화시키기 위해 로봇 자신의 상태뿐 아니라 물체의 자유도까지 고려해야 하기 때문에 많은 어려움이 있었다. Mobile ALOHA는 가상환경에서 고정된 팔에 의한 물체의 조작을 위한 강화학습 모델을 실제 환경에서 수십 번의 데이터만으로도 활용할 수 있도록 하여 난제로 알려진 수많은 조작 임무를 수행함을 보였다. 이것은 로봇이 머지않은 미래에 높은 조작 수준을 요구하고 노동집약적인 집안일(House Chore)을 해결할 수 있음을 기대하게 만들었다.

강화학습은 조작뿐 아니라 보행에서는 더 큰 변화를 가져왔는데, 특히 중국은 사족 보행 로봇, 휴머노이드 로봇을 가리지 않고 뛰어난 성취를 공개하고 있다. 이제 사족 보행 로봇은 흠바닥에서 미끄러짐을 감수하며 보행하고, 높은 턱을 넘으며, 자갈과 잔디가 우거진 지형에서도 보행을 해낼 수 있게 되었다. Marco Hutter 교수를 중심으로 한 ETH의 강화학습 접근법은 보행 로봇으로 하여금 다양한 상황에서의 유연하고 안정적인 동작을 가능케 하였다. 이렇듯 현재 2024년은 단 수 년만에 하드웨어적 측면과 소프트웨어적 측면에서의 빠른 발전으로 눈부신 성과와 가능성을 보인다. 비단 보행/조작 로봇뿐 아니라 Soft Robotics, Wearable Robotics 분야에도 적용되어 많은 발전이 진행되고 있다.

그림 6. Mobile ALOHA (Stanford University)



* 출처: Fu et al. (2024)

VI. 마치며

선진국을 중심으로 보이는 저출산과 고령화에 의한 노동력 감소 현상은 특히 대한민국에 더 크고 일찍 찾아오고 있다. AI가 이미 일상생활 깊숙이 들어와 많은 편의를 제공하는 현재를 넘어 물리적 임무 수행이 가능한 로봇에 대한 기대감은 위의 사회적 변화에 대응하기 위한 시대적 요구를 받고 있다. 로봇을 구성하는 주요 요소기술의 발전으로 휴머노이드 로봇의 눈부신 발전을 중심으로 모든 종류의 로봇 시스템의 발전이 골고루 진행되고 있기 때문에 밝은 미래를 기대하는 사람들이 많다. 이러한 변화에서 대한민국은 첨단 산업이라 일컫는 반도체, 배터리, 전기차 등에 로봇 시스템을 활용한 생산성 증대를 오랫동안 기대해 왔다.

대학, 연구소에의 정부 차원의 투자는 연구 활동에서 소비되는 다양한 부품/소재/장비를 다루는 중소/중견 기업으로의 간접적인 투자가 되며 동시에 전문인력 양성이라는 가장 중요한 요소를 유지하게 하는 핵심 예산 활용이라고 생각한다. 로봇과 같은 융합기술의 성장은 이를 둘러싼 수많은 부품 및 요소기술을 다루는 주변 기업 및 연구소/학교의 성장이 함께 도모되어야 함을 잊지 않았으면 한다. 미국, 특히 중국이라는 인접국의 우수한 제조업 역량에 더해진 소프트웨어적 성장까지 고려한다면 한국은 이러한 글로벌 경쟁 무대에서 뒤처지지 않도록 다방면적인 투자와 관심이 필요하다고 생각한다. 그리고 이공계 인력에 대한 사회적 대우와 인식도 범국민적으로 개선되기를 교육자이자 연구자로서 소망한다.

저자소개 이인호 (Inho Lee)

• 학력

한국과학기술원 기계공학과 학사/석사/박사

• 경력

現) 부산대학교 전기전자공학부 교수
前) IHMC(Institute for Human and
Machine Cognition) 연구원
前) 한국과학기술원 박사후연구원

참고문헌

〈국외문헌〉

- 1) Fu, Zipeng, Tony Z. Zhao, and Chelsea Finn. (2024). "Mobile aloha: Learning bimanual mobile manipulation with low-cost whole-body teleoperation." arXivpreprint arXiv: 2401.02117.

〈기타문헌〉

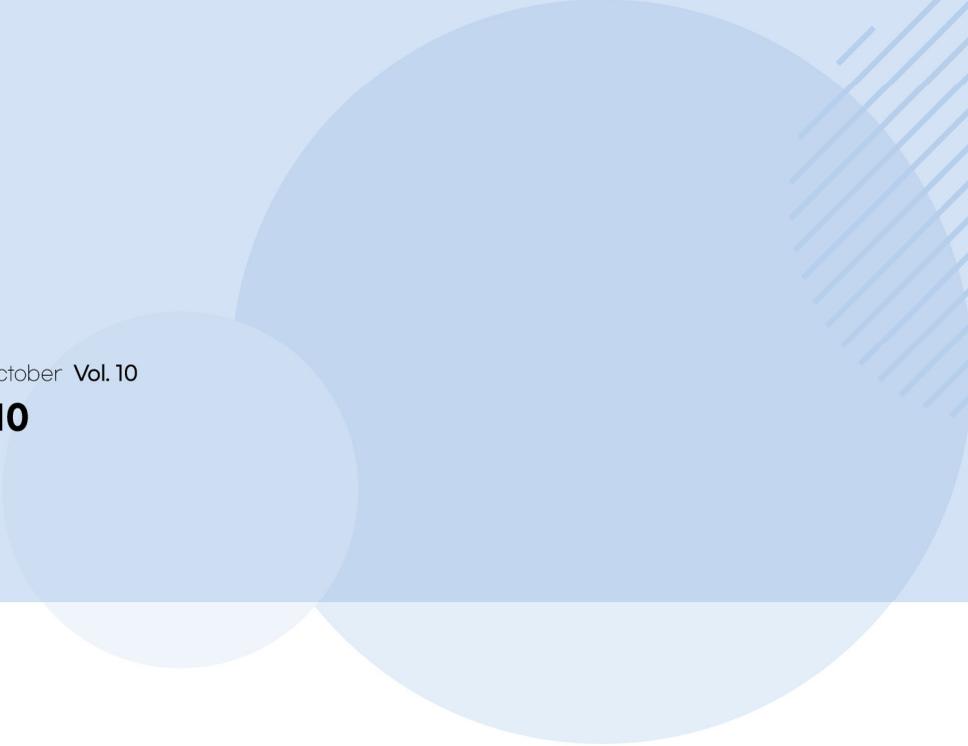
- 1) Ben Katz Blog. (2019). Building All The Robots.
<https://build-its-inprogress.blogspot.com/2019/11/building-all-robots.html>
- 2) Boston Dynamics. www.bostondynamics.com
- 3) FigureAI. www.figure.ai
- 4) Honda Asimo. www.global.honda/en/robotics/asimo/
- 5) IEEE Spectrum. (2014). Who Is SCHAFT, the Robot Company Bought by Google and Winner of the DRC.
<https://spectrum.ieee.org/schaft-robot-company-bought-by-google-darpa-robotics-challenge-winner>
- 6) IEEE Spectrum. (2015). How South Korea's DRC-HUBO Robot Won the DARPA Robotics Challenge.
<https://spectrum.ieee.org/how-kaist-drc-hubo-won-darpa-robotics-challenge>
- 7) IEEE Spectrum. (2019). How MIT's Mini Cheetah Can Help Accelerate Robotics Research. <https://spectrum.ieee.org/mit-mini-cheetah-accelerate-research>
- 8) IEEE Spectrum. (2023). Your Robotic Avatar is almost ready.
<https://spectrum.ieee.org/xprize-robot-avatar>
- 9) Robotics today. <https://www.roboticstoday.com/robots/spring-flamingo>
- 10) Tesla. www.tesla.com/en_eu/AI
- 11) 서울경제. (2023). 사람이 원격조종하는 아바타 로봇, 세계 6위 성능 UNIST R&D 박차.
<https://www.sedaily.com/NewsView/290I6CI674>
- 12) 카이스트 신문. (2011). 국산로봇, HUBO는 계속 진화한다.
<https://times.kaist.ac.kr/news/articleView.html?idxno=823>



융합연구리뷰
Convergence Research Review

2024 October Vol. 10

No. 10



융합정책

데이터 과학 기반 미래유망 융합연구 분야 발굴 방법과 사례

미래융합전략센터 데이터분석팀

데이터 과학 기반 미래유망 융합연구 분야 발굴 방법과 사례

미래융합전략센터 데이터분석팀

I. 서론

융합연구는 단일 학문이나 기술이 해결하기 어려운 복잡한 문제를 다루기 위해 다양한 분야의 지식과 기술을 통합하여 창의적이고 혁신적인 결과를 도출하는 연구 과정으로 지식기반사회로 일컬어지는 현대 사회에서 새로운 성장동력을 창출하는 중요한 방법론으로 자리 잡고 있다. 융합연구는 하나의 트렌드가 아닌 전 학문 분야에 있어 필수적이고 보편적인 연구 방법론으로 여겨지며(노영희·김태훈, 2022), 다양한 분야의 전문가 아이디어와 연구방법을 공유하고 통찰력의 통합을 통해 문제를 해결(또는 새로운 가치를 창출)하는 과정(MIT, 2016; 이경재, 2020)으로 인식되고 있다.

특히 글로벌 경쟁이 심화되는 현시점에서 다른 국가나 기관에서 시도하지 않은 융합연구 분야를 발굴하고 선점하는 것은 미래 과학기술 경쟁력 강화를 위한 중요한 전략이라 할 수 있다. 국가 차원에서 새로운 융합연구 분야를 개척함으로써 글로벌 연구 주도권을 잡고 산업 및 사회적 문제 해결에 있어 선도적인 역할을 할 수 있는 것이다.

이와 함께, 최근 머신러닝, 딥러닝 등 데이터 분석 기술의 발달로 인하여 데이터 과학의 중요성이 급부상하고 있다. 방대한 데이터를 처리하고 분석하는 기술은 단순한 통계적 분석을 뛰어넘어 지금까지 알 수 없었던 숨겨진 패턴을 발견하고 예측할 수 있는 능력을 제공함으로써 다양한 연구 분야에서 강력한 도구로 활용되고 있다. 특히, 빅데이터와 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기술의 발전은 기존 연구의 속도를 가속화함은 물론 새로운 연구 분야 발굴의 가능성 또한 크게 확장시켰다.

이러한 측면에서 데이터 과학을 기반으로 미래가 유망한 융합연구 분야를 발굴하는 것은 필연적인 흐름일 수 있다. 이미 기존의 연구 수행 방식에 혁신을 가져오고 있는 데이터 과학은 특정 연구 분야의 트렌드를 예측하고 그 가능성을 탐색하는 데 있어서도 큰 역할을 할 수 있다.

본 보고서에서는 이러한 관점을 바탕으로, 데이터 과학을 활용한 국내외 미래 유망 융합연구 발굴 방법론을 제안하고자 한다. 이를 위해, 먼저 ①데이터 과학, ②융합연구, ③유망 연구분야 발굴 방법론의 이론적 배경을

고찰하고, 각 개념과 관련된 최근 동향 및 사례를 살펴볼 것이다. 이후, 이러한 개념들을 접목하여 새로운 융합연구 분야를 발굴하는 빅데이터 기반 미래유망 융합연구 분야 발굴 방법론을 소개함으로써, 데이터 과학이 향후 융합연구를 어떻게 발굴하고 촉진시킬 수 있는지를 살펴보고 정책적 시사점을 발굴하고자 한다.

II. 각 개념의 이론적 배경 및 최근 동향

1. 데이터 과학

데이터 과학은 대규모 데이터를 수집하고 처리한 후, 이를 분석하여 유의미한 정보를 도출하는 학문 분야이다. 데이터 과학의 핵심 목표는 데이터 속에서 패턴을 발견하고, 이를 기반으로 중요한 결정을 내리거나 문제를 해결하는 것이다. 특히 데이터 과학은 '21세기의 원유'로 표현(Gartne, 2012)될 정도로 그 가치와 잠재력을 주목받고 있는 방대한 '빅데이터'를 효율적으로 관리하고 분석함으로써 다양한 산업 및 연구 분야에서 새로운 기회를 창출하고, 더 나은 성과를 도출할 수 있도록 지원한다.

데이터 과학의 기초는 주로 통계학과 수학적 모델링에 뿌리를 두고 있다. 전통적인 통계 방법론을 통해 데이터에서 유의미한 패턴을 발견하고 이를 기반으로 분석해 온 것이 그 출발점이다. 이후 컴퓨터 과학의 발전과 함께, 더 복잡한 데이터 분석과 처리 기술이 도입되면서 데이터 과학은 점차 기계 학습(Machine Learning), 딥러닝(Deep Learning) 등으로 대표되는 AI 기술을 포괄하게 되었다.

AI 기술로 데이터 과학은 한 차원 더 발전했다. 기계 학습은 전체 데이터를 기반으로 모델을 학습하고, 이를 통해 새로운 데이터에 대해 예측하거나 분류할 수 있는 기능을 제공한다. 이는 전통적인 통계학적 표본 추출 기반 데이터 분석 방식과 차별화되며, 모든 데이터의 복잡한 특성과 관계를 자동으로 학습할 수 있으므로 데이터가 방대할수록 그 장점이 극대화된다. 또한 기계 학습에서 더 고도화된 하위 분야라 할 수 있는 딥러닝은 인간의 뇌를 닮은 신경망 구조를 통하여 빅데이터를 학습하여 인간이 미처 발견하지 못한 복잡한 관계를 찾아내는 강력한 도구이다. 데이터 마이닝 또한 데이터 과학의 중요한 구성 요소로, 방대한 양의 빅데이터에서 유의미한 정보나 패턴을 추출하는 과정이다. 데이터 마이닝은 다양한 알고리즘을 사용해 데이터 간의 상관관계를 파악하고, 이를 통해 기존에 알지 못했던 지식을 도출해낸다.

딥러닝과 같은 복잡한 기계 학습 기법은 높은 예측 성능을 제공하지만, 그 결과가 어떻게 도출되었는지 설명하기 어렵기 때문에, 신뢰성과 투명성에 대한 문제가 있을 수 있다. 이러한 한계는 특히 의료, 금융, 법률 등과 같은 고위험 분야에서 AI를 통한 의사결정이 책임성, 윤리적 요구 등을 충족시키기 어려운 상황을 만들었다. 유럽연합 일반 데이터 보호 규정(GDPR)과 우리나라 개인정보보호법과 같은 법률에서 AI 결과에 대한 설명을 의무화하기에 이르렀고(문상룡 외, 2024), 이러한 규제는 앞으로 더욱 강화될 것으로 예상된다.

이에 따라 최근 데이터 과학 분야에서는 AI의 결정 과정을 이해하고 설명할 수 있는 인공지능(Explainable Artificial Intelligence, XAI)¹⁾이라는 개념이 주목받고 있다. XAI은 복잡하고 설명 불가능한 ‘블랙박스(Black-box)’식 AI 모델의 예측 결과가 왜 도출되었는지를 명확하게 설명함으로써 의사결정 과정에서 AI의 설득력이나 타당성 확보는 물론, 윤리적 문제나 책임 문제를 해결하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. XAI 기술은 모델 개선, 새로운 통찰력 확보, 법적 책임 및 규제 준수 확인 등 다양한 이점을 가져올 것으로 기대된다(Samek, W. et al., 2017).

2. 융합연구

융합은 두 개 이상의 기술요소가 화학적으로 결합하여 기존의 기술이 갖지 않은 새로운 기능을 발휘하는 기술 혁신의 한 현상(이공래·황정태, 2005), 산업이 함께 문제를 해결해나가는 공동 기술혁신 현상(Rosenberg, 1963) 등으로 정의할 수 있다. 연구과정에 초점을 맞춰 융합을 바라볼 때 융합은 새롭게 주목받는 개념으로 포착된다(오현석, 배형준 & 김도연, 2012).

융합연구는 두 개 이상의 서로 다른 학문이나 기술을 결합하여 새로운 문제를 해결하거나 혁신적인 결과를 도출하는 연구 방식으로, 단순히 여러 학문을 병렬적으로 적용하는 것에서 더 나아가, 각 학문이 상호작용하고 협력하여 새로운 통찰을 얻고 기존의 문제를 보다 창의적으로 해결하려는 시도이다. 융합은 다양한 장소에서, 다양한 수준으로, 그리고 다양한 유형과 형태로 일어나고 있으며(Frodeman, Klein & Mitcham, 2010), 융합연구는 그 안에서 새로운 지식과 기술의 융합을 통해 전통적인 연구 방법으로는 해결하기 어려운 문제를 다룬다.

이러한 연구 방식은 복잡한 문제들이 단일 학문이나 기술로는 충분히 해결될 수 없다는 인식에서 출발했다. 예를 들어, 기후 변화, 에너지 문제, 인구 고령화와 같은 사회적, 환경적 문제는 경제학, 공학, 생명과학, 정보기술 등 여러 학문이 함께 협력하여 해결해야 하는 다차원적 문제들이다. 융합연구는 이러한 복잡한 문제에 대응하기 위한 효과적인 연구 전략으로 자리 잡고 있다.

융합연구는 다학제적 연구(multidisciplinary research)와 학제 간 연구(interdisciplinary research)라는 개념을 거치며 발전해왔다. 다학제적 연구는 두 학문 분야가 협력하여 문제를 해결하되, 각자가 자신의 분야에서 세부적인 문제를 다루고 그 결과를 단순히 결합하는 방식의 연구이다(Mallon & Burton, 2005; Slatin et al., 2004). 학제간 연구는 다양한 학문 분야의 지식과 기술을 통합하여 새로운 방식으로 문제를 해결하는 접근법을 뜻한다(Schummer, 2004). 융합연구는 여기에서 더 나아가 서로 다른 학문이 공동의 목표를 위해 지속적인 상호작용을 통해 협력하는 방식이라고 할 수 있다. 이는 학문 간 경계를 허물고, 새로운 패러다임을 만들어내는 점에서 다학제적 연구, 학제 간 연구와 차별화된다.

1) 유럽연합의 일반정보보호 규정(General Data Protection Regulation, GDPR)에 따르면 인공지능 알고리즘이 내리는 결정을 설명할 수 있어야 하며, 은행과 같은 금융기관 등에서는 인공지능 기반 의사결정의 이유를 명확히 설명해야 하는 규제가 생겨나고 있다. XAI는 규제의 변화와 기술 발전에 따라 그 필요성이 더욱 커지고 있으며, 다양한 기관과 산업에서 AI의 신뢰성을 보장하는 필수 기술로 자리잡을 가능성이 높다.

그림 1. 융합연구 유형

	다학제 연구 Multidisciplinary research	학제 간 연구 Interdisciplinary research	초학제 연구 Transdisciplinary research	변혁적 연구 Transformative research
설명	<ul style="list-style-type: none"> - 다른 학문 분야가 하나의 문제에 대해 병렬적으로 연구 - 지식을 교환하지만, 새롭고 통합된 지식과 이론을 만들기 위해 주제의 경계를 넘지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> - 공통 목표를 달성하기 위해 주제 경계를 넘나드는 방식으로 관련되지 않은 여러 학문 분야를 포함 ※ 신경과학 (생물학, 물리학, 공학) 	<ul style="list-style-type: none"> - 인문사회 및 비학계의 적극적 참여를 통해 새로운 지식 창출, 공통 목표 달성 (과학지식의 보완·변형) ※ 기후변화(농업, 기후과학, 수문학, 생물다양성, 역사, 사회), 모빌리티(공학, 보건의료, 사회심리학, 법학) 	<ul style="list-style-type: none"> - 과학, 공학 또는 교육에서 중요한 기존 개념에 대한 이해를 근본적으로 전환, 새로운 패러다임 분야 창조 ※ 인간 게놈지도, 탄소 섬유, 레이저, 딥러닝, CRISPR 유전자 편집
개요도				

* 출처: 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획(23~27)

융합연구의 중요성은 특히 21세기에 들어서면서 사스(SARS), 신종플루, 메르스(MERS) 그리고 코로나19 (COVID-19)까지 전 세계적으로 대유행을 야기한 여러 감염병으로 인한 과학적 도전을 맞닥뜨리게 되면서 더욱 두드러지게 되었다. 예를 들어, 생물학과 컴퓨터 과학의 융합으로 등장한 생물정보학(bioinformatics)은 생명과학의 데이터를 분석하고 처리하는 새로운 도구를 제공했다. 이러한 융합연구는 기존의 연구 방법론과는 다른 차원의 연구 접근법을 제시하고, 결과적으로 각 분야의 혁신적인 발전을 가능하게 했다.

최근에는 다양한 학문 간 협력이 활성화되면서, 융합연구가 더 넓은 범위에서 이루어지고 있다. 이러한 동향은 주로 새로운 기술과 학문의 발전에 의해 촉진되고 있다. 대표적인 융합연구 영역인 인간-컴퓨터 상호작용 (Human-Computer Interaction, HCI) 분야의 경우 AI, 사물인터넷(IoT), 인지과학, 바이오 테크놀로지와 같은 첨단 기술과의 결합을 통하여 연구 영역을 크게 확장하고 있다.

최근의 융합연구는 다학제적 접근이라는 특징 외에 문제(임무) 중심의 연구라는 특성을 지닌다. 즉, 융합연구는 특정 문제를 해결하기 위한 목적을 중심으로 이루어진다. 이는 기존의 학문적 경계를 넘어서, 문제가 요구하는 다양한 지식과 기술을 통합적으로 적용하는 방식이라 할 수 있다. 이러한 맥락에서 OECD는 임무지향형 혁신정책(Mission-Oriented Innovation Policy, MOIP)을, EU는 제9차 프레임워크 프로그램 Horizon Europe(21~27)에서 연구혁신 임무를, 일본은 정부 주도 문샷(Moonshot) R&D 프로그램을 통하여 임무지향형 정책을 추진하고 있다.

표 1. 미국·유럽 융합연구 프로그램 특징

구분	미국	유럽
융합목적	사회적 가치 확립·문제해결(지속가능 사회), 신경쟁력(기술·산업·제품 등) 창출	유럽사회문제 해결, 국가 경쟁력 확보
융합연구방식	대형국책연구사업인 다부처 공동연구 & 소규모 기관 간 협동 프로그램(정책·사업 일체형, 범분야 협력체계 구축)	Horizon 2020 중·장기 대형 프로젝트 (先 정책방향 설정, 後 세부 연구사업 기획)
투자우선순위	다부처 공동프로그램 연구개발 정책 우선순위와 부합성	EU정책목표 부합성
연구주제선정	bottom-up&Top-down 혼합형 : 목표지향적(vision-inspired)기초연구 지향	사회적 문제 해결형 연구: 아젠다 제시(Top-down) 미래 이머징 기술(FET): 연구진 제시(Bottom-up)
융합연구특징	융합(수렴-발산 순환 구조)에 대한 이해 바탕 의사결정	의제설정(Agenda-setting), 의제설정 과정 중요성 강조 기초연구부터 상용화까지 소과정과 혁신활동에 중점
융합연구주제	※ 국가 과학기술 이니셔티브 - 국가 정보기술(빅데이터, 슈퍼컴퓨팅) - 바이오(정밀의학) - 나노(포토닉스, 소재계능, 그랜드챌린지 등) - 브레인/로봇 - 스마트시티 - STEAM교육 - 기후변화 - 제조혁신 국가 네트워크	※ Horizon 2020 사회적 과제(7개 분야) - 건강, 인구변화, 웰빙 - 식량안보, 지속가능 농업, 해양 및 해상연구, 바이오 경제 - 안정적이고 깨끗한, 효율적 에너지 - 스마트, 녹색 및 통합운송 - 기후대처, 자원효율 및 원료 - 동반사회 - 안전한 사회

* 출처: 최종화 외(2017) 재정리

3. 미래유망 연구분야 발굴 방법론

미래유망 연구분야 발굴 방법론은 특정 연구 영역에서 미래에 중요한 역할을 할 가능성이 있는 주제나 기술을 탐색하고, 이를 바탕으로 연구 프로젝트나 과제를 기획하는 과정을 말한다. 이 방법론은 주로 새로운 과학적 발견이나 기술 혁신을 목표로 하며, 전 세계적으로 빠르게 변화하는 연구 환경 속에서 과학기술의 경쟁력을 유지하는 데 중요한 역할을 한다.

연구 분야 발굴 방법론은 미래 예측, 사회적 수요 분석, 과학기술 트렌드 분석, 문헌 조사, 전문가 의견수렴 등 다양한 방법론이 결합되어 있다. 연구 분야 발굴은 당장의 문제 해결을 위한 것이 아닌, 향후 몇 년 또는 몇십 년간 중요한 연구 과제가 될 수 있는 주제를 선별하는 과정을 거쳐야 하므로 매우 전략적이고 장기적인 관점을 요구한다.

미래유망 연구분야 발굴 방법론의 근간은 미래 예측 기법(futures studies)과 기술 예측 기법(technology foresight)에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 미래 예측 기법은 과학기술을 포함, 정치, 경제 등 사회 전 분야의 거시적 발전 방향성을 예측하는 기법으로, 20세기 중반부터 주로 정부와 기업에서 장기 계획을 세울 때 활용되기 시작했다. 한편, 기술 예측은 특정 기술이 언제 어떻게 도입되고 활용될지, 향후 발전 가능성이나 사회적 영향은 어떠한지 예측하는 기법이다.

미래 예측 기법과 기술 예측 기법에 주로 쓰이는 세부 방법론으로는 델파이 기법(Delphi Method), 시나리오 기법(Scenario Planning), 기술 로드맵(Technology Roadmapping) 등이 있다. 델파이 기법은 다양한 분야의 전문가들로부터 반복적으로 의견을 수집하고 피드백을 통해 합의를 도출하는 과정이다. 델파이 기법은 특히 불확실성이 큰 분야에서 연구 주제나 기술의 중요성을 예측하는 데 매우 유용하다.

표 2. 국내외 미래유망기술 주요 발표 사례

구분	연구기관 및 보고서명	주제 및 선정방법	시작 년도
국내	한국과학기술기획평가원 “KISTEP 10대 미래유망기술”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 미래이슈에 대응하기 위한 유망기술 ▶ (방법) 문헌조사 및 전문가 의견 수렴 등 ① 문헌조사 및 전문가 의견수렴 등을 통해 핵심 트렌드 선정 ② 핵심 트렌드와 관련된 주요 미래 이슈 도출 ③ 설문조사 및 전문가 의견수렴 등을 통한 향후 10년 내 유망한 기술 선정 ④ 유망기술별 심층분석 정보 서비스 	2009
	한국과학기술정보연구원 “KISTI 10대 미래유망기술”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 미래 신시장·산업 창출 위한 유망기술 ▶ (방법) 논문 데이터 기반의 빅데이터 분석 및 딥러닝 기술 활용 ① 논문 데이터를 이용한 과학기술 지도 생성 ② 기술 클러스터 관측 및 모니터링 ③ 머신러닝 기반 기술 클러스터의 미래성장 가능성 예측 모형 적용 ④ 7년 후 성장가능성이 높은 유망기술 후보군에 정량·정성적 평가기준을 적용하여 최종 선정 	2006
	한국생명공학연구원 “바이오 10대 미래유망기술”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 바이오산업 혁신 및 부가가치 확대를 위한 유망기술 ▶ (방법) 문헌조사 및 전문가 심층토론 등 ① 바이오 분야 최신 연구결과와 참고문헌 이종성 및 키워드 네트워크 분석 결과를 토대로 전문가 심층토론 등을 통해 후보 기술 도출 ② 후보기술에 대한 파급효과 평가를 위해 설문조사 추진 	2015
국외	MIT “10 Breakthrough Technologies”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 사회경제적 파급효과를 가져올 향후 인류가 추구할만한 가치 있는 유망기술 ▶ (방법) 각 분야 최고 전문가들의 자문을 통해 유망기술 선정 	2001
	WEF “Top10 Emerging Technologies”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 향후 5년 내 인류에게 긍정적인 영향을 미칠 유망기술 ▶ (방법) 11명의 전문가로 구성된 국제운영위원회(International Steering Committee)에서 후보 도출 후 평가를 통해 선정 	2011
	Gartner “Top 10 Strategic Technology Trends”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 3~5년 내 급부상할 것으로 예상되는 IT 분야 유망기술 ▶ (방법) IT 및 비즈니스 산업에 파급적 잠재력이 있거나, 거대 투자기업이 관심을 가지고 있는 기술 등을 평가하여 선정 	2004
	Deloitte “Tech Trends”	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (주제) 향후 18~24개월 이내 비즈니스를 변화시킬 중요한 트렌드 ▶ (방법) 유망기술이 기업 활동과 사회에 미치는 영향을 분석 	2010

* 출처: 박창현 외(2024) 재정리

시나리오 기법은 미래의 다양한 가능성을 다룰 수 있는 기법으로, 특정 주제나 기술이 여러 환경 변화 속에서 어떻게 발전할 수 있는지를 다양한 관점에서 예측하는 방식이다. 이를 통해 다양한 상황에 대한 대비책을 마련할 수 있다.

기술 로드맵도 연구 분야 발굴에 중요한 도구로 사용된다. 기술 로드맵은 특정 기술이 발전하는 단계를 시각적으로 표현하여, 언제 어떤 연구가 필요하고, 그 연구가 어떻게 기술 혁신에 기여할지를 명확히 보여준다. 이러한 로드맵은 기업, 연구 기관, 정부가 미래의 연구 분야를 기획하고 계획하는 데 도움을 준다.

최근 들어 연구 분야 발굴에서 빅데이터 분석 기법이 주목받기 시작했다. 빅데이터 기반 연구 분야 발굴은 대규모 학술 출판물 데이터, 특허 데이터, 연구 과제 데이터 등을 분석하여 특정 분야의 연구 동향이나 기술적 트렌드를

파악하고, 이를 바탕으로 유망한 연구 주제를 도출하는 방식이다. 이러한 데이터 기반의 접근은 기존의 전문가 의견 수렴 방식 등과 달리 객관적인 데이터를 기반으로 한다는 장점이 있다.

미래 유망 연구 분야는 현재 명확히 드러나지 않지만, 중장기적으로 사회에 큰 영향을 미칠 잠재력을 지니고 있다. 이러한 이머징 이슈(emerging issue)는 약한 신호(weak signal)라는 특성 때문에 탐색이 어려워 전통적으로는 전문가가 이러한 이슈를 발굴하고 미래 전략을 수립하는 역할을 했지만(유순덕 외, 2014), 오늘날 폭발적으로 증가하는 비정형 데이터를 텍스트 마이닝과 자연어 처리 기술로 분석하여 데이터 간의 숨겨진 관계를 발견한다면, 보다 효율적으로 이머징 이슈를 탐지할 수 있다(송민, 2021).

III. 각 개념의 접목 사례

1. 데이터 과학 + 융합연구

데이터 과학과 융합연구의 접목은 현대 과학기술 발전의 중심에 자리하고 있다. 각각의 분야는 독립적으로도 중요한 발전을 이루어 왔으나, 데이터 과학과 융합연구의 접목은 전통적인 학문적 경계를 허물고 새로운 연구 기회를 창출하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 융합연구의 기본 목표는 여러 학문적 접근법을 결합하여 새로운 문제 해결 방식을 찾아내는 것이며, 데이터 과학은 방대한 데이터 분석을 통해 새로운 지식과 통찰을 도출하여 다양한 분야에서 혁신과 기술 발전을 가속화하는 것이다.

데이터 과학은 특히 복잡한 데이터 세트와 비정형 데이터를 처리하고, 그 속에서 규칙성과 패턴을 발견하는 데 강점이 있다. 이러한 특성은 융합연구에서 연구자가 다루기 어려운 문제를 분석하고 해결하는 데 매우 유용하다. 예를 들어, 생물학, 물리학, 사회과학 등의 다양한 분야에 걸친 연구 문제들은 복잡하고 상호 연결된 데이터를 포함하고 있는데, 데이터 과학은 이를 분석하여 학문 간 시너지를 창출하는 데 중요한 기여를 할 수 있다.

1.1. 융합연구를 통한 데이터 과학의 발전 촉진

미국 국립과학재단(NSF)이 주도하는 TRIPODS(Transdisciplinary Research in Principles of Data Science) 프로그램은 융합연구를 데이터 과학 증진의 수단으로 사용한 사례 중 하나이다. 이 프로그램의 목표는 데이터 과학의 이론적 기초를 강화하는 동시에, 다양한 학문적 배경을 가진 연구자들이 협력하여 새로운 문제 해결 방식을 찾아내는 것이다. TRIPODS는 통계학, 수학, 컴퓨터 과학 등 여러 분야의 연구자들이 협력하여 데이터 과학의 원리를 다학제적으로 연구하고 있다.

TRIPODS의 지원을 받아 콜롬비아 대학교에서 진행된 From Foundations to Practice of Data Science and Back(2017.8. ~ 2019.9., NSF Award Number: 1740833) 프로젝트는 수학, 통계학, 컴퓨터 과학

융합연구를 통해 비볼록 최적화(Non-convex optimization) 기법²⁾, 심층 학습 모델 개발 등의 데이터 과학 분야의 성과를 도출했다. 이러한 기술은 미세 구조 데이터 해석, 천체물리학, 재료 과학, 신경과학, 영상 처리 및 헬스케어와 같은 다양한 응용 분야에 걸쳐 활용 가능성이 있다.

그림 2. Columbia 대학 내 TRIPODS 수행주체

Columbia TRIPODS Institute

From Foundations to Practice of Data Science and Back

The Columbia TRIPODS Institute aims to articulate methodological foundations for data science, spanning mathematics, statistics, and computing. Our emphasis is on foundations to support practice, through the analysis of successful heuristics, the development of well-structured computational toolkits, and the development of theory to support the entire cycle of data science.

We pursue these goals through a program of **research, education, and center building**.

Research Themes include

- Interactive protocols for data science
- Primitives for efficient computation
- Tractable classes of (nonconvex) optimization problems

Faculty


 Alexandr Andoni


 David Blei


 Qiang Du


 Daniel Hsu


 Clifford Stein


 John Wright


 Tian Zheng

Opportunities
 We are recruiting excellent **postdoctoral scholars** [job posting] and **PhD students** for interdisciplinary work in the foundations of data science.

Contact
 407 Mudd Hall, in the Data Science Institute
 Data Science Institute
 Columbia University

Acknowledgement
 We gratefully acknowledge support from the National Science Foundation through the award CCF 1740833.

* 출처: Columbia Univ.

워싱턴 대학교에서 진행된 Safe Imitation Learning for Robotics (2018.10. ~ 2022.9., NSF Award Number: 1839371) 프로젝트의 경우, 통계학, 머신러닝, 수학적 최적화 등의 융합연구를 통해 다양한 로봇 시스템에서 안전한 모방학습 알고리즘³⁾을 설계했다. 이를 통해 데이터 과학 이론의 발전은 물론, 다양한 응용

- 2) 비볼록 최적화 기법은 전통적인 볼록 최적화에 비해 더 복잡하고 다양한 해가 존재하는 문제들을 다루는 특성 때문에 여러 산업 분야에서 폭넓게 응용될 수 있다. 노이즈 제거, 초해상도 영상 복원 등의 컴퓨터 비전 분야, 장애물을 회피하면서 최적의 경로를 찾는 로보틱스 분야, 공급망 네트워크에서의 경로를 최적화하는 물류 분야, 신약 개발과정에서의 분자의 화학적 특성을 최적화하는 바이오 및 제약 분야 등 그 활용 범위는 무궁무진하다.
- 3) Safe Imitation Learning(안전 모방 학습)은 인간의 행동을 모방하여 로봇이 작업을 학습할 수 있도록 하는 기법으로, 사람과 로봇이 동일한 작업 공간에서 함께 작업하는 경우 사고나 기계 손상을 최소화하면서 효율성을 극대화할 수 있다. 또한, 의료 재활 과정에서 로봇이 인간 물리치료사의 동작을 학습하여 환자에게 적합한 운동을 안전하게 수행하도록 하는 데 활용될 수 있으며, 고령자나 장애인을 돌보는 헬스케어 로봇이 사람의 돌봄 활동을 안전하게 학습하여 신체적 상해를 방지하고 사용자와 안전하게 상호작용할 수 있다.

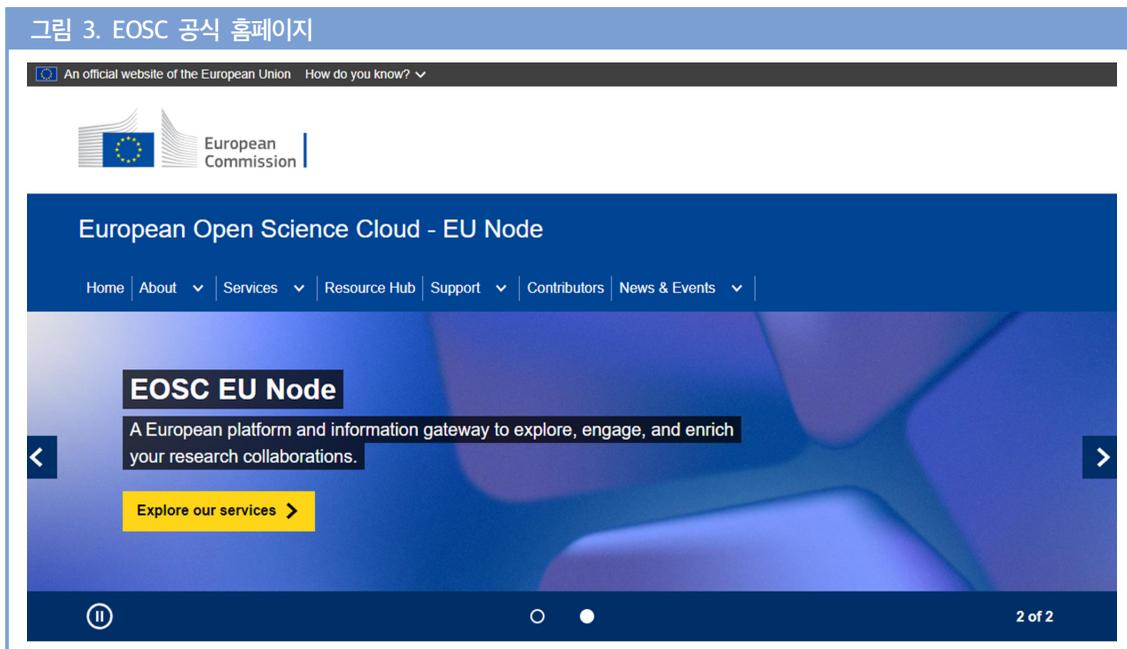
분야에서 데이터 기반 문제 해결이 가능해질 수 있다. 특히, 데이터 수집 및 처리에서의 안전성을 보장함으로써, 로봇 공학뿐만 아니라 공공 보건, 제조업, 의료, 물류 등 여러 분야에서 응용될 수 있다.

TRIPODS 프로그램의 핵심은 학문 간 통합 연구를 촉진함으로써 데이터 과학의 발전을 증진하는 데 있다. TRIPODS는 데이터 과학의 이론적 발전과 그 응용 가능성을 다양한 학문적 틀에서 탐구함으로써, 기존 연구의 한계를 극복하고 데이터 분석의 새로운 접근법을 개발하는 데 기여하고 있다. 이를 통해 데이터 과학은 단순한 도구가 아닌, 새로운 학문적 통찰을 제공하는 중요한 자원으로 자리 잡고 있다.

1.2. 데이터 과학을 통한 융합연구의 발전 촉진

유럽연합(EU)은 'Horizon Europe' 프로그램의 일환으로 유럽 오픈 사이언스 클라우드(EOSC)를 도입했다. EOSC는 연구 데이터의 공유와 재사용을 촉진하는 디지털 인프라를 구축하여 융합연구의 효율성을 극대화하는 것을 목표로 한다. 연구 데이터는 이제 단순히 연구 과정의 부산물이 아닌, 학문적 통합을 촉진하는 중요한 자원으로 여겨진다. EOSC는 연구자가 생성한 데이터를 클라우드 기반의 플랫폼에서 관리하고, 이를 전 세계 연구자들이 공유할 수 있도록 한다.

그림 3. EOSC 공식 홈페이지



* 출처: <https://open-science-cloud.ec.europa.eu/index.php/>

EOSC의 핵심 목표는 학문 간 경계를 허물고, 연구자가 각자의 데이터를 더 쉽게 접근하고 활용할 수 있게 함으로써 융합연구를 촉진하는 것이다. 예를 들어, 생물학자가 생성한 유전자 데이터와 물리학자가 수집한 환경 데이터를 동일한 플랫폼에서 분석할 수 있도록 하여, 전통적으로 별개의 연구로 여겨졌던 학문들 사이에 새로운 통찰을 이끌어낼 수 있다.

B2PREDICT 프로젝트⁴⁾는 EOSC에서 제공하는 디지털 기술과 서비스를 이용하여 개인 전기 모빌리티 고장 예측 시스템 연구개발에 성공한 사례이다. 이 프로젝트는 EOSC의 컴퓨팅 자원을 활용하여 데이터 처리와 모델 학습 속도를 크게 향상, 전기 모빌리티의 고장 및 이상 동작을 예측하는 알고리즘을 개발시켰으며, 이를 통해 TRL 6 단계에 도달하여, 사용자와 상호작용할 수 있는 최소 기능 제품(Minimum Viable Product, MVP)을 개발했다.

EOSC의 인프라를 활용하여 농업 분야에서 자동화 수확 로봇을 개발하는 프로젝트인 MiFOOD⁵⁾ 또한 AI와 로봇 기술을 융합하여 농업 효율성을 높인 융합연구 성공사례라고 할 수 있다. 이 시스템은 다양한 데이터 소스를 통합하여 작물 관리와 자원할당 과정을 모니터링하고 최적화했으며, 로봇이 자율적으로 심기, 수확, 제초 등의 작업을 수행할 수 있도록 설계되어, 농업의 생산성과 지속 가능성을 크게 향상시켰다. EOSC의 데이터 저장 및 분석 기능이 농업의 운영 효율성 향상, 비용 절감은 물론 지속 가능성을 확보하게 했다. TRL 단계는 6에서 7로 상승하여, 로봇 시스템의 상용화 가능성도 커졌다.

EOSC는 위와 같이 다양한 학문이 상호 작용할 수 있는 기반을 마련함으로써 연구 효율성을 높일 뿐만 아니라, 융합연구의 가능성을 확대하고 있다. EOSC는 단순한 데이터 공유를 넘어, 새로운 지식 창출을 촉진하는 혁신적인 디지털 인프라로 기능하고 있다고 볼 수 있다.

그림 4. MiFood 공식 홈페이지



* 출처: <https://mifood.es/>

- 4) BikeSquare라는 유럽소재 기업이 주도하고 있는 B2PREDICT 프로젝트는 EOSC의 클라우드 컴퓨팅 자원을 활용하여 GPS 데이터를 처리하고, 모빌리티의 성능 정보를 분석, 모빌리티의 이상 동작을 감지하고, 유지보수가 필요할 경우 실시간으로 경고를 보내는 시스템을 개발하였다. 이를 통해 모빌리티 대여 서비스에서 발생할 수 있는 손상이나 고장을 사전에 예측, 비용과 시간을 절감할 수 있다.
- 5) MiFOOD 프로젝트는 농업에서 노동력 부족, 식량 낭비, 농장 운영 비용 문제를 해결하기 위해 자동화된 로봇 시스템을 통해 작물을 안전하게 수확하는 기술을 개발하였다. 특히 EOSC 데이터를 활용한 AI·로봇 기술의 발전을 통해 농작물 수확의 효율성을 극대화하는 데 중점을 두고 있다.

2. 데이터 과학 + 미래유망 연구분야 발굴

데이터 과학과 연구 분야 발굴 방법론의 결합은 미래 연구 방향을 예측하는 데 매우 효과적인 도구로 자리 잡고 있다. 전통적으로 연구 분야 발굴은 전문가의 경험과 직관, 수요 조사, 문헌 조사 등을 바탕으로 이루어졌으나, 이러한 방식은 시간이 많이 소요되고 객관성이 부족할 수 있다는 한계가 있었다. 데이터 과학의 도입은 이러한 한계를 극복하며, 방대한 데이터 분석을 통해 연구의 패턴을 파악하고, 향후 유망한 연구 분야를 보다 효율적이고 정확하게 예측할 수 있게 한다.

데이터 과학은 특히 빅데이터 분석, AI 기술을 활용하여 대규모 연구 데이터, 특허 정보, 출판물 등을 분석함으로써, 특정 연구 주제의 미래 유망성을 객관적으로 예측할 수 있다. 이를 통해 연구 기관은 미래의 기술 트렌드를 파악하고, 이에 부합하는 새로운 연구 분야를 발굴할 수 있다.

예를 들어, 학술 출판물 데이터 분석은 특정 주제나 기술에 대한 연구가 급격히 증가하는 시점과 그 연구의 주제 간 상관관계를 분석할 수 있다. 이러한 분석은 학문적 트렌드를 파악하는 데 도움을 주며, 특정 분야에서의 연구 공백이나 아직 충분히 탐구되지 않은 영역을 찾아내는 데 유용할 수 있다. 또한 특허 분석은 기술 발전 동향을 파악하는 중요한 도구로, 기업이 미래에 집중 투자할 분야를 파악하고, 이를 바탕으로 향후 연구 방향성을 예측할 수 있다.

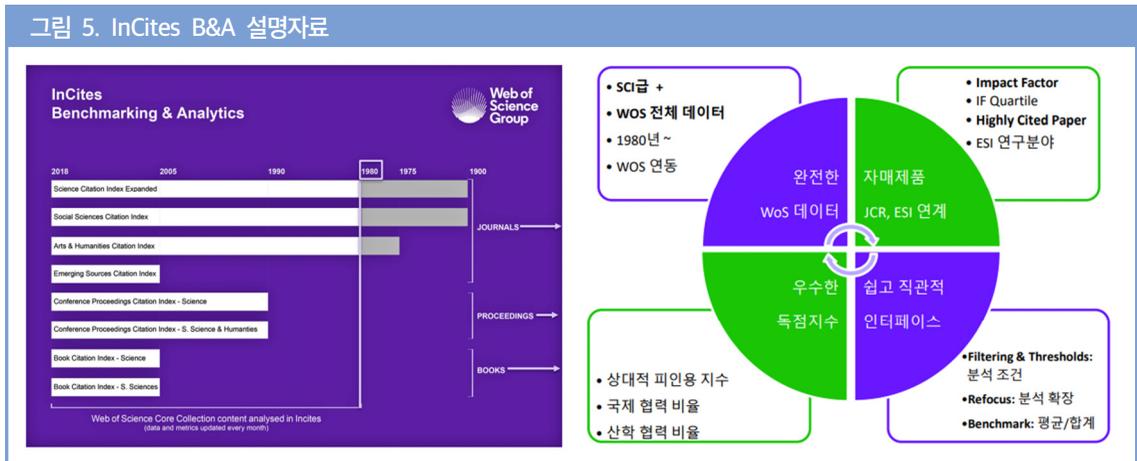
자연어 처리(Natural Language Processing, NLP)와 같은 기술이 학술 출판물과 특허 데이터를 분석하는 데 주로 활용된다. 이는 연구 논문이나 기술 보고서에서 중요한 키워드나 주제를 자동으로 식별하여, 그 분야의 연구 동향을 보다 신속하고 정확하게 파악할 수 있게 한다. NLP는 복잡한 비정형 데이터에서 의미를 추출하는 데 매우 유용하며, 연구 분야 발굴의 초기 단계에 있어 시행착오를 최소화할 수 있다.

기계 학습은 데이터를 분석하여 과거의 연구 경향을 학습하고, 이를 바탕으로 미래에 어떤 연구 주제가 유망할지 예측하거나 특정 연구 주제 간의 상관관계를 파악하고, 아직 연구되지 않은 잠재적 연구 주제를 발굴하는 데 유용하다. 예를 들어, 기계 학습을 활용함으로써 학술 출판물과 특허 데이터의 증가율, 연구비 지원 규모, 해당 분야의 연구자 수 등을 종합적으로 분석하여 특정 기술이 언제, 어떻게 발전할 가능성이 있는지 예측할 수 있다. 또한, 이를 통해 연구자들이 어떤 분야에 더 많은 자원을 투자해야 할지, 또는 어떤 연구 주제가 향후 큰 사회적, 경제적 영향을 미칠지를 예측할 수 있게 된다.

데이터 과학을 연구 분야 발굴에 도입함으로써 얻게 되는 주요 장점 중 하나는 객관성과 효율성이다. 데이터 과학은 데이터에 기반하여 예측 결과를 도출하기 때문에, 주관적 판단이나 개인의 경험에 의존하지 않고도 특정 연구 주제의 발전 가능성을 객관적으로 평가할 수 있다. 이는 기존의 연구 분야 발굴 방식에서 흔히 발생하던 인간에 의한 편향성을 극복하는 데 도움이 된다. 또한, 데이터 과학은 방대한 데이터를 빠르게 처리할 수 있기 때문에, 연구자가 개별적으로 데이터를 수집하고 분석하는 데 걸리는 시간을 크게 단축시킬 수 있다.

클래리베이트(Clarivate)와 같은 학술 출판 회사는 데이터 과학을 이용하여 연구 트렌드 분석을 자동화하고, 특정 연구 주제가 어떻게 발전할지 예측해주는 서비스(InCites B&A)를 제공하고 있다. 이와 같은 서비스를 통해 연구자는 자신이 속한 분야뿐만 아니라 관련된 다양한 연구 주제의 발전 방향을 파악할 수 있으며, 연구의 효율성을 극대화할 수 있다.

그림 5. InCites B&A 설명자료



* 출처: 한국 Clarivate

InCites B&A는 Web of Science 데이터를 기반으로 하며, 논문의 인용 수, H-인덱스, 피인용 횟수 등을 분석하여 연구의 영향력을 평가할 수 있다. 이를 통해 특정 연구자의 성과뿐만 아니라 연구 기관이나 국가 차원에서도 연구 성과를 비교할 수 있으며, 이를 바탕으로 연구 투자나 전략을 수립할 수 있다. 예를 들어, 연구 성과가 높은 분야에 대한 추가 투자를 결정하거나, 특정 분야에서의 연구 개선 방안을 마련할 수 있다.

과학동아(2022)는 한국과학기술정보연구원과의 협력하에 데이터 과학에 기반하여 미래 연구 트렌드를 분석한 바 있다. 네덜란드 라이덴대 클러스터 데이터 및 최근 몇 년간 발표된 논문 데이터를 활용한 분석을 통해 성장성이 높은 미래유망 연구분야를 예측하였다.

그림 6. 긴 비암호화 RNA 연구 트렌드



* 출처: (저작권 문제로 Blind 처리) 과학동아 2022

예를 들어, 긴 비암호화 RNA 연구가 최근 급격히 증가했으며, 유전자치료제 시장에서 중요한 역할을 할 것으로 예상하였다. 이 외에도 그래핀 연구와 같은 신소재 과학, 그리고 AI 분야에서의 최신 트렌드와 기술 성장 가능성을 제시하였다.

3. 융합연구 + 미래유망 연구분야 발굴

융합연구와 미래유망 연구분야 발굴 방법론의 결합은 현대 과학 기술에서 새로운 연구 영역을 개척하고 유망한 연구 주제를 탐색하는 데 필수적인 접근 방식이 될 수 있다. 전통적으로 연구 분야 발굴은 개별 학문 내에서 이루어졌지만, 다양한 사회적, 기술적 문제의 복잡성이 증가하면서 다학제적이고 융합적인 접근이 요구되고 있기 때문이다. 융합연구는 여러 학문이 상호 보완적으로 결합해 창의적이고 혁신적인 해결책을 찾는 데 중점을 두며, 이러한 특성은 연구 분야 발굴에서도 중요한 역할을 한다.

연구 분야 발굴은 미래의 과학 및 기술 발전을 예측하고, 사회적 필요에 대응하기 위한 연구 주제를 식별하는 과정이다. 이 과정에서 융합연구의 도입은 기존의 학문적 경계를 넘어선 연구 주제를 발굴하고, 학문 간 협력을 통해 보다 다각적인 문제 해결을 도모할 수 있게 해준다.

미래유망 융합연구분야 발굴은 전통적으로 전문가 자문, 수요 조사, 문헌 조사를 통해 이루어졌다. 각각의 학문에서 도출된 연구 공백을 찾아내고 이를 메우기 위해 다학제적 접근을 시도하는 것이 주된 방식이었다. 특히, 다양한 분야의 전문가들이 모여 협력할 수 있는 연구 주제를 발굴하고, 서로의 시각과 관점을 결합하여 더 나은 해결책을 모색하는 과정이 중요했다.

예를 들어, 기후 변화 문제 해결을 위해 환경 과학자, 경제학자, 정책 전문가가 협력하여 연구 주제를 도출하는 방식은 전통적인 융합연구 주제 발굴의 한 형태라 할 수 있다. 이와 같은 방식은 각 학문에서 다루기 어려운 복잡한 문제를 해결하는 데 효과적이다. 그러나 이러한 방식은 여전히 전문가의 해당 분야에 한정된 경험과 직관에 의존하는 경향이 있으며, 장기적인 관점에서 융합기술의 발전 경로를 객관적·체계적으로 예측하는 데에는 한계가 있다.

시나리오 기법은 불확실성이 큰 상황에서 복합적 문제에 대한 다양한 가능성을 고려한 연구 분야를 탐색하는 데 유용할 수 있다. 여러 학문이 결합되어야 하는 융합연구 분야에서는 시나리오 기법을 통해 각각의 학문이 어떻게 상호작용할 수 있을지를 효과적으로 예측하고, 새로운 연구 주제를 발굴할 수 있다.

예를 들어, 스마트 시티 프로젝트는 도시 계획, 정보 기술, 환경 과학, 사회학 등 다양한 학문이 융합되어야 하는 대표적인 사례인데, 시나리오 기법을 통해 이러한 분야들이 어떻게 협력할 수 있을지에 대한 다양한 시나리오를 작성하고, 각각의 학문이 기여할 수 있는 연구 주제를 도출할 수 있다.

특정 기술이 발전하는 단계를 예측하고, 그 발전 과정에서 필요한 연구 주제를 체계적으로 발굴하는 기술 로드맵 또한 융합연구 발굴에 있어 중요한 방법론이다. 기술 로드맵은 복잡한 문제 해결을 위해 여러 학문적 접근이 필요한 경우 각 단계에서 어떤 학문이 어떻게 기여할 수 있을지를 명확히 보여주기 때문이다. 기술 로드맵은 특히 학문적 협력을 구조화하는 데 도움이 된다. 예를 들어, 재생 에너지 분야에서 기술 로드맵을 활용해 에너지 저장 기술, 전력

시스템 설계, 환경 영향 평가 등 다양한 학문이 기여할 수 있는 연구 주제를 체계적으로 도출이 가능하다. 각 학문이 기여할 수 있는 기술 발전 단계가 명확히 제시되므로, 연구자들은 협력을 통한 시너지를 극대화할 수 있다.

국가 차원의 대규모 연구 프로젝트에서는 특히 적절한 융합연구 분야 발굴 방법론이 중요할 수 있다. 예를 들어, 국가 에너지 문제 해결을 위해 전력, 화학, 환경, 경제 등의 학문이 협력하여 융합연구 주제를 발굴할 수 있다. 이 과정에서 전문가 자문, 시나리오 기법, 기술 로드맵 기법을 결합해 각 분야가 어떻게 융합될 수 있는지, 그리고 어느 시점에서 어떤 연구가 필요한지를 체계적으로 예측할 수 있다.

이와 같은 방법을 통하여 유망한 융합연구 분야를 선제적으로 발굴하고 연구개발하는 대표적인 기관이 MIT 미디어 랩⁶⁾이라 할 수 있다. MIT 미디어랩은 기술, 디자인, 인문학 등 다양한 분야를 융합해 새로운 연구 주제를 발굴하고 있다. 특히, 데이터 과학, AI와 같은 첨단 기술뿐만 아니라, 디자인, 윤리학 등 다양한 분야를 결합해 기술과 인간의 상호작용을 연구하는 것이 특징이다.

MIT 미디어랩은 의학, 공학, 재료과학 등 다양한 분야의 전문가들이 참여한 Conformable Ultrasound Breast Patch (cUSBr-Patch) 프로젝트는 유방암 조기 발견을 목표로 한 착용 가능한 초음파 기기를 설계하고 개발했다. 이 장치는 유방에 부착할 수 있으며, 종양을 조기에 감지하는 데 도움을 줄 수 있다. 이는 의료 영상 기술, 웨어러블 기술, AI 등 다양한 분야의 최신 기술이 통합된 결과로 기존의 진단 방법보다 접근성이 뛰어나고, 자주 사용하여 진단 정확성을 높일 수 있다.



* 출처: MIT Media Lab.

6) 1985년에 설립된 매사추세츠공과대학(Massachusetts Institute of Technology, MIT) 산하 연구소

MIT 미디어랩의 우주 탐사 이니셔티브(Space Exploration Initiative, SEI)의 일환으로 의학, 공학, 우주과학, 재료공학, 인체공학 등 다양한 분야의 전문가들이 협력하여 10년 이상의 연구 끝에 개발에 성공한 Gravity Loading Countermeasure Skinsuit(GLCS)는 우주 비행 중 발생하는 미세 중력의 생리적 영향을 완화하기 위해 설계된 복장이다. 이 복장은 인체에 중력의 영향을 시뮬레이션하는 기능을 가지고 있어, 우주 비행사들의 근골격계 건강을 유지하는 데 도움을 줄 수 있다.

4. 데이터 과학 + 융합연구 + 미래유망 연구분야 발굴

데이터 과학, 융합연구, 그리고 미래유망 연구분야 발굴 방법론의 결합은 현대 연구의 새로운 패러다임을 창출하는 핵심적인 접근 방식이 될 수 있다. 각각의 요소는 독립적으로도 중요한 역할을 하지만, 이들이 결합될 때 연구의 효율성과 창의성이 극대화된다. 데이터 과학은 방대한 데이터를 분석하고 패턴을 찾아내는 데 중요한 도구로, 다양한 학문적 데이터를 통합해 연구 트렌드를 예측하는 데 기여한다. 융합연구는 여러 학문 간의 협력을 통해 복잡한 문제를 해결하고, 연구 분야 발굴의 새로운 가능성을 제시한다. 미래유망 연구분야 발굴 방법론은 이러한 데이터 분석과 융합적 사고를 통해 미래의 연구 주제를 전략적으로 발굴하는 과정이다.

이 세 가지 요소의 결합은 특히 전통적인 연구 방법론으로는 탐구하기 어려운 복잡한 문제를 해결하는 데 효과적이다. 데이터를 기반으로 연구 분야를 발굴하고, 융합연구를 통해 각 학문이 어떻게 상호작용할 수 있는지를 파악하는 과정은, 미래 과학기술의 발전을 가속화하고 연구의 새로운 방향을 제시하는 데 큰 도움을 줄 수 있다.

이러한 관점에서 한국과학기술연구원 융합연구정책센터(現. 미래융합전략센터, 2013)는 논문, 특허, 산업 데이터 분석에 정책, 사회적 수요 분석을 추가하여 국가나 지역 사회의 추진 전략이나 사회적 수요 현황을 기술 분석에 반영한 형태의 전방위적 현황 분석을 위해 4PN 개념⁷⁾을 제안한 바 있다. 이후 해당 개념은 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획('23~'27) 내, '진화하는 융합생태계' 전략 중 하나로 소개됨으로써 정부 차원에서 추진해야 할 중점 목표가 되었다.



* 출처: 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획('23~'27)

7) 2013년 당시 KIST-고려대 융합연구정책센터 연구팀에 의해, Paper, Patent, Product, Policy의 4P와 Social Needs의 N의 조합에 따른 '4PN 분석'이라 명명

미래융합전략센터는 4PN 분석에 기반한 미래유망 융합기술 보고서를 발간 예정('24.12.)으로, 이는 세부 기술 분야별로 성장 가능성, 융합성, 국내 연구 기반 등 다양한 정량 지표⁸⁾를 종합적으로 다루어, 미래 유망 융합연구 분야를 발굴하는 데 중요한 의사결정 자료로 활용될 수 있다.

특히, 미래융합전략센터는 전체 기술분야(4,215개) 중 미래유망 융합기술 후보 분야(371개)를 선별 후 정량적 지표의 특성에 따라 이를 프론티어 연구, 첨단산업(전략), 첨단 기반기술, 다학제 연구, 첨단산업(공백) 분야로 구분하였는데, 이는 추후 연구분야 발굴 및 지원 전략을 각 분야의 특성에 부합하도록 설계하기 위한 근거 자료로 쓰일 수 있다.



* 출처: 미래유망 융합기술 데이터북(안)

5. 소결

데이터 과학은 연구 수행 과정 또는 연구 성과를 관리, 평가하는 데 있어 주로 쓰이고 있으며, 연구의 신뢰성과 정확성을 높이고 연구 성과를 더욱 객관적으로 검증하는 강력한 도구로 자리 잡았다. 하지만 연구를 기획하거나 연구 주제를 발굴하는 단계에서는 여전히 수요 조사와 전문가 자문 등 연구자의 직관이나 경험에 크게 의존하는 경향이 있다.

최근 들어서 데이터 과학을 통해 과학 출판물, 특히 데이터, 기술 동향 축하는 사례가 발생하고 있다. 이를 통해 연구자 또는 정책입안자가 등의 방대한 데이터를 분석하여 미래 유망한 기술이나 연구 주제를 예측 연구 주제의 발전 가능성을 객관적인 데이터를 기반으로 예측하고 새로운 연구 프로젝트를 기획하는 것이 가능해졌다.

하지만 이러한 데이터 과학에 기반한 연구 과제 발굴 기법은 아직 초기 단계에 머물러 있다고 볼 수 있다. 이러한 예측 기술들이 정책·제도적으로 뒷받침이 되는 사회적으로 신뢰성 있는 방법론으로 정립되었다고 보기는 어렵기 때문이다.

그럼에도 불구하고, 최근 몇 년간 데이터 과학의 발전은 과학 기술 연구 기획 과정에 분명 변화를 가져오고 있다. 앞으로 데이터 과학은 다양한 학문적 데이터를 통합하여 연구 분야 발굴 과정에서 더 정교하고 객관적인 예측을 가능하게 할 것이며, 융합연구가 필요한 분야를 사전에 식별하여 연구 기획의 효율성을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

8) 4,215개의 Leiden 클러스터를 대상으로 '급성장', '파급력', '신규성', '지속성' 등의 유망기술(Emerging Technology)을 구성하는 속성(Cozzens et al. 2010; Avila-Robinson and Miyazaki 2011; Boyack et al. 2012; Rotolo, Hicks, and Martin 2015) 제시

IV. 결론 및 정책적 시사점

본 보고서에서는 데이터 과학을 활용한 융합연구 분야 발굴의 필요성과 그 방법론, 그리고 실제 사례를 중심으로 다루었다. 데이터 과학은 복잡한 데이터를 처리하고 분석하는 능력을 통해 연구 분야 발굴과 융합연구를 보다 체계적이고 객관적으로 수행할 수 있게 하는 강력한 도구로 자리 잡고 있다. 특히 데이터 과학은 방대한 빅데이터를 기반으로 미래 유망 연구 분야를 예측하고 이를 바탕으로 새로운 연구 주제를 발굴하는 과정에서 그 역할이 더욱 중요해지고 있다.

융합연구는 다학제적 접근이 필수적인 문제 해결 과정에서 강력한 효과를 발휘하며, 데이터 과학의 발전은 이러한 융합연구의 가능성을 크게 확장하고 있다. 이를 통해 학문 간 경계를 허물고 다양한 관점에서 문제를 해결할 수 있는 새로운 연구 주제들이 지속적으로 발굴될 것으로 보인다.

하지만 데이터 과학에 기반한 연구 기획 등의 적용은 아직 초기 단계에 있으며, 더 많은 연구와 사례가 축적될 필요가 있다. 데이터 과학 기술이 모든 분야에 적용되기 위해서는 기술적 발전뿐만 아니라, 이를 연구 기획에 실제로 활용할 수 있는 인프라와 연구자·정책입안자의 역량이 함께 강화되어야 한다. 이러한 관점에서 아래와 같은 정책적 시사점을 제시한다.

1. 융합연구를 통한 데이터 과학 고도화

데이터 과학은 융합연구의 중심에 자리하고 있으며, 특히 다양한 분야에서 복잡·다단한 문제 해결을 위한 활용 가능성이 크다. 이러한 측면에서 데이터 과학의 이론적 기반을 다학제적 융합연구를 통해 고도화하는 미국 NSF의 TRIPODS(Transdisciplinary Research in Principles of Data Science) 프로그램의 전략은 참고할 만하다. 해당 사업을 통해 연구자는 데이터 과학 자체 기술을 발전시키고, 다양한 분야에서 융합연구를 촉진하는 기술적 기반을 강화할 수 있다. 실제 TRIPODS 프로그램을 수행하였던 Michael W. Mahoney(2019)는 해당 프로그램의 시의적절성과 중요성을 강조하면서, 데이터 과학은 현재 도구 사용법(Python 활용법 등)에 지나치게 집중되어 있고 기초 원리에 대한 이해는 부족하며, 기초연구에 투자하지 않으면 결국 데이터 과학은 깊이를 잃고 분야 간 융합도 어렵게 된다고 하였다.

데이터 과학 선진국인 미국에서도 이러한 문제의식을 바탕으로 데이터 과학 자체의 고도화를 우선시하는 전략을 채택(TRIPODS, 2017~2022)하였고, 이후 해당 프로그램의 범위를 확장하여 천문학, 유전학, 재료 과학, 신경 과학, 사회 과학 등 다양한 데이터 기반 학문과의 상호작용을 촉진(TRIPODS-X, 2018~2023)하고자 하였다. 서두에 이야기하였듯 데이터 과학을 기반으로 융합연구 분야를 발굴·수행하는 것을 필연적인 흐름이라고 간주한다면, 우리나라 역시 선제적으로 데이터 과학을 발전시킬 융합연구 프로그램을 마련하고, 이를 통해 데이터 기반 융합연구의 기회를 확대하는 방향을 고려해 볼직하다.

2. 융합연구에 활용할 수 있는 데이터 활용 인프라 강화

우리나라는 경제 활성화와 사회가치 창출 등을 위해 공공 데이터 개방정책을 적극 추진(윤상오·현지우 2019)하고 있지만, 대부분의 연구기관은 연구 데이터 공유·활용 전략의 실행을 지원할 수 있는 인프라 및 역량이 아직 부족(조민희 외, 2019)하다. 데이터 과학 기반 융합연구를 지원하기 위해서는 데이터 활용 인프라를 강화하여 연구자 또는 연구개발 정책입안자가 쉽게 접근하고 사용할 수 있도록 해야 한다. 이를 통해 데이터 활용이 연구 기획 단계부터 적용될 수 있는 환경이 조성될 필요가 있다.

이러한 측면에서 데이터 과학을 바탕으로 다양한 학문적 데이터와 연구 결과를 통합해 연구자 간 협력을 촉진하고 연구의 효율성을 극대화하고 있는 유럽연합의 EOSC(European Open Science Cloud) 사례⁹⁾는 참고할 만하다. 우리나라도, 연구자원의 재사용을 확대하고 상호운용성을 높일 수 있도록, 개별적으로 관리되고 있는 플랫폼들을 통합하여 관리할 수 있는 연구데이터 생태계 지원 통합 인프라 구축(이미경 외, 2023) 등 다양한 측면에서의 연구 데이터 활용 인프라 강화 방안이 마련될 필요가 있다.

3. '데이터 기반 융합연구 마인드셋'을 가진 연구자·정책입안자 규모 확대

데이터 과학이 융합연구와 연구 분야 발굴에 필수적인 도구로 자리잡기 위해서는 많은 연구자와 연구개발 정책입안자가 데이터 기반 융합연구의 본질에 대한 깊은 이해를 바탕으로 데이터 리터러시(데이터 문해력)를 높이는 것이 중요하다. 이를 위해 맞춤형 교육 프로그램, 전문 트레이닝 등 데이터 분석 기술, 데이터 활용 역량을 강화하는 정책적 지원이 필요할 수 있다. 특히, 데이터 과학의 기본 개념을 넘어, 실제 연구 기획과 실행에 적용할 수 있는 실질적인 데이터 활용 방법을 교육하는 것이 중요하다.

TRIPODS의 후속 사업 성격인 TRIPODS-X 프로그램(2018)의 경우 19건의 과제 중 4건의 과제를 데이터 과학 교육 과제(education track projects)로 할당함으로써 TRIPODS 사업에 참여하는 연구자로 하여금 데이터 과학에 대한 이해를 증진시키고자 하였고, XTRIPODS(2023) 프로그램의 경우, TRIPODS에 참여하는 인력의 규모 및 다양성 확대가 데이터 과학 자체의 발전은 물론 데이터 과학의 사회적 파급효과에 있어서 핵심적인 요인이라고 보고, 연구수행 주체를 R1(연구중심 대학, Research 1) 등급이 아닌 학교 또는 기관으로 확대하였다.

9) 유럽 오픈사이언스 클라우드(EOSC), 호주 연구데이터커먼즈(ARDC), 일본 연구데이터 클라우드(NII-RDC)가 데이터 중심의 연구개발을 지향하면서 연구데이터 뿐만 아니라 연구개발 전 과정에 필요한 리소스를 공유·활용하기 위한 정책 및 프로젝트의 대표적인 사례이다(이미경 외, 2023).

그림 10. Harmless Statistical Decision Theory 소개

Using data for policy decisions: NSF funds economics study

7/17/2023

By | **Kate Blackwood**, **A&S Communications**

How can policy makers better use data to make decisions? With a National Science Foundation (NSF) Grant, three Cornell economists in the College of Arts and Sciences (A&S) will develop innovative methods for data-driven policy choices.

* 출처: 코넬대학교

NSF의 지원을 받아 코넬 대학교에서 2023년부터 수행하고 있는 Mostly Harmless Statistical Decision Theory 과제¹⁰⁾는 정책입안자가 데이터를 활용하여 불확실성 하에 최적의 의사결정을 할 수 있도록 이론적 기반을 마련하는 연구라 할 수 있다. 직접적인 교육 프로그램은 아니지만 데이터 과학을 정책적 의사결정에 접목하는 연구로, 연구개발 관련 정책입안자의 데이터 이해도 증진 관점에서 본 연구의 진행 경과를 참고해 볼 수 있겠다.

4. 마치며

데이터 과학, 융합연구, 유망 연구분야 발굴 방법론의 이론적 배경, 최근 동향과 사례조사, 그리고 본 조사를 통하여 발굴된 정책적 시사점으로 미루어 보건대, 지속 가능하고 효과적인 방법으로 데이터 과학에 기반하여 융합연구 분야를 발굴하기 위해서는 데이터 과학 기술을 고도화하고, 데이터 활용 인프라를 강화한 후, 연구자와 정책입안자의 견고한 데이터 기반 융합연구 마인드셋을 바탕으로 연구 주제를 지속적으로 발굴 및 수행할 수 있는 체계를 마련해야 할 것으로 판단된다.

향후 더 많은 데이터 과학 관련 연구가 축적되고 인프라, 인력이 충분히 성숙해지면, 데이터 과학 기반의 연구 기획은 더욱 일반화되고, 이는 연구 효율성을 극대화하는 동시에 과학적 발견을 앞당기는 중요한 도구로 자리 잡을 가능성이 크다. 이를 통해 우리나라의 과학 기술의 발전이 가속화될 뿐만 아니라, 다양한 사회적 문제 해결에도 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

저자소개 미래융합전략센터 데이터분석팀

김우중 선임(과학기술정책, 빅데이터분석기사), 02-958-6178, wjkimrocks@kist.re.kr

이경혜 박사(데이터분석팀장) 02-958-4975, khlee@kist.re.kr

박정환 연구원(빅데이터분석기사, 정보처리기사), 02-958-4987, jh654@kist.re.kr

10) <https://as.cornell.edu/news/using-data-policy-decisions-nsf-funds-economics-study>

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 고학수, 김용대, 윤성로, 김정훈, 이선구, 박도현, 김시원 (2020). 인공지능 원론 : 설명가능성을 중심으로
- 2) 문상룡, 안현철, 한윤. (2024). XAI 설명방식이 사용자의 인지된 이해도와 신뢰도에 미치는 영향: 조절초점의 역할. 지능정보연구, 30(3), 373-392, 10.13088/jiis.2024.30.3.373
- 3) 박창현, 정선민, 전해수(2024), 2024년 KISTEP 미래유망기술 선정에 관한 연구 - '생성형 인공지능' 시대의 미래유망기술 -, KISTEP 2023-011.
- 4) 안재현(2020). XAI 설명 가능한 인공지능, 인공지능을 해부하다
- 5) 오현석, 배형준 & 김도연 (2012). 과학기술분야 융합연구자의 융합연구 입문과 과정에 관한 연구. 아시아교육연구, 13(4), 297-335.
- 6) 유순덕, 이민수, 신선영 (2014), 「미래예측 방법론 , 주간기술동향 통권, 1646, 정보통신산업진흥원, 1-13
- 7) 윤상오·현지우 (2019). “공공데이터 개방정책의 실태분석 및 개선방안에 관한 연구”, 한국공공관리학보, 22(1): 219-247.
- 8) 이경재 (2020). 지속가능한 출연(연) 융합생태계 조성의 조건 - 국가과학기술연구회 융합연구사업 발전을 위한 제언 -. KISTEP Issue Paper 2020-17(통권 제295호).
- 9) 이공래, 황정태 (2005). 다분야 기술융합의 혁신시스템 특성 분석. 과학기술정책연구원.
- 10) 이미경, 조민희, 임형준 (2023). 연구데이터 생태계 지원 통합 인프라 구축 방안. KISTI ISSUE BRIEF.
- 11) 조민희, 김성찬, 김진영, 송사광 (2019). “연구데이터 공유 활성화를 위한 시범 서비스 개발”, 한국정보과학회 2019년 학술발표논문집, 1132-1134.
- 12) 최종화, 이광호, 조용래, 우청원, 이충현, 김은아 (2017). 정부출연연구기관의 협력적 융합연구 촉진방안, STEPI 정책연구 2017-12.

〈국외문헌〉

- 1) Avila-Robinson, A., and K. Miyazaki. 2011. “Conceptualization and Operationalization of Emerging Technologies: A Complementing Approach.” In Technology Management in the Energy Smart World (PICMET), 2011 Proceedings of PICMET '11:, 1-12.

참고문헌

- 2) Boyack, K. W., R. Klavans, H. Small, and L. Ungar. 2012. "Characterizing Emergence Using a Detailed Micro-Model of Science: Investigating Two Hot Topics in Nanotechnology." In *Technology Management for Emerging Technologies (PICMET), 2012 Proceedings of PICMET '12:*, 2605-11.
- 3) Cozzens, Susan, Sonia Gatchair, Jongseok Kang, Kyung-Sup Kim, Hyuck Jai Lee, Gonzalo Ordóñez, and Alan Porter. 2010. "Emerging Technologies: Quantitative Identification and Measurement." *Technology Analysis & Strategic Management* 22 (3): 361-76. <https://doi.org/10.1080/09537321003647396>.
- 4) Frodeman, R., Klein, J. T., & Mithcam, C. (2010). Preface. In R. Frodeman, J. T. Klein & C. Mitcham (Eds.), *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*. NY: Oxford University Press.
- 5) Gartner (2012. 6). "The Importance of 'Big Data': A Definition".
- 6) Mallon, W. T., & Burnton, S. (2005). The functions of centers and institutes in academicbiomedical research. *Analysis in brief*, 5(1), 1-2.
- 7) MIT(2016), "Convergence: The future of health", <http://www.convergencerevolution.net/2016-report>
- 8) Rosenberg, N. (1963). Technological change in the machine tool industry, 1840-1910. *Thejournal of economic history*, 23(4). 414-443.
- 9) Rotolo, Daniele, Diana Hicks, and Ben R. Martin. 2015. "What Is an Emerging Technology?" *Research Policy* 44 (10): 1827-43. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006>.
- 10) Samek, W., Wiegand, T., & Muller, K. R.(2017). *Explainable Artificial Intelligence: Understanding, Visualizing and Interpreting Deep Learning Models*.
- 11) Schummer, J. (2004), Multidisciplinarity, interdisciplinarity, and patterns of researchcollaboration in nanoscience and nanotechnology, *Scientometrics*, 59, 425-465.
- 12) Slatin, C., Galizzi, M., Melillo, K. D., & Mawn, B. (2004). Conducting interdisciplinaryresearch to promote healthy and safe employment in health care: promises andpitfalls. *Public health reports*, 119(1), 60-72.



융합연구리뷰

Convergence Research Review



이 보고서는 2024년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 작성되었음.

(2023M3C1A604340012)



융합연구리뷰

Convergence Research Review