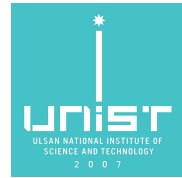


보도자료

온라인은 4월 15일(수) 배포 즉시
 지면은 4월 16일(목) 조간
 부터 보도해 주시기 바랍니다



자료문의

대외협력팀: 장준용 팀장, 양윤정 담당
 기계공학과: 정임두 교수

052-217-1227
 052-217-3060

“눈짓만으로 로봇 조종한다” ... AI 스마트 콘택트렌즈 개발 - UNIST 정임두 교수팀, 렌즈 일체형 광학 센서 기반 지능형 인터페이스 개발 - - 마스크 없는 센서 패터닝·초해상도 신호 복원 AI 기술 적용... Adv. Funct. Mater. 게재 -

눈짓만으로 로봇을 움직일 수 있는 스마트 콘택트렌즈가 개발됐다. 렌즈를 낀 채 안구를 굴리면, 로봇 팔이 안구 방향을 따라 움직인다. 무겁고 복잡한 기존 확장현실(XR) 기기를 대신할 차세대 인간-기계 인터페이스 기술로 주목받고 있다.

UNIST 기계공학과 정임두 교수(인공지능대학원 겸직) 연구팀은 센서를 렌즈에 직접 인쇄하는 특수 기술과 센서의 저해상도 신호를 고해상도로 복원하는 AI 기술을 결합해, 로봇 팔을 원격 제어할 수 있는 스마트 콘택트렌즈를 개발했다고 15일 밝혔다.

이 렌즈 위에는 100개(10x10)의 빛 검출 센서가 집적돼 있는데, 눈을 움직일 때마다 달라지는 빛 분포를 이 센서가 읽어내 시선 방향을 추적하는 원리로 작동한다. 위·아래·좌·우는 물론 대각선 방향까지 구분할 수 있으며, 이 시선 정보가 로봇 팔로 전달돼 팔이 움직인다. 안구의 깜박임으로 물건을 집을 수도 있다.

연구진은 둥근 렌즈 표면에 센서를 직접 프린팅할 수 있도록 ‘메니스커스 픽셀 프린팅(MPP)’ 기술을 개발해 적용했다. 노즐 끝에 맺힌 센서 원료 잉크를 렌즈 표면에 콕콕 찍어내는 형태의 기술이다. 메니스커스는 액체의 볼록하거나 오목한 곡면을 말하는데, 이 곡면 덕분에 잉크가 배출되는 힘과 잉크 퍼짐을 막는 힘이 균형을 이뤄 잉크를 원하는 양만큼 찍어낼 수 있다. 잉크를 건조하면 빛을 감지하는 페로브스카이트 물질만 남아 센서 역할을 하게 된다.

일반 센서 제작과 달리 센서 패턴을 새기기 위한 마스크가 필요 없고 다양한 안구 곡률에 맞춰 센서를 인쇄할 수 있어 개별 맞춤형 렌즈를 만들 수 있는 장점이 있다.

렌즈라는 작은 공간 탓에 신호 해상도가 떨어지는 문제는 인공지능 기술을 결합해 해결했다. 실제로는 100개의 센서가 있지만, 딥러닝 기반의 초해상도 기술을 적용하면 최대 6,400개(80x80)의 센서가 있는 것과 같은 신호 데이터를 얻을 수 있다. 재구성에 필요한 시간도 0.03초로 짧아 정보가 실시간 수준으로 로봇 팔에 전달될 수 있다.

안구 모형을 이용한 실험에서, 눈동자 움직임만으로 물체를 집어 옮기는 동작까지 이뤄졌으며, 방향 인식 정확도는 99.3% 수준을 기록했다.

이번 연구는 UNIST 기계공학과 공병훈, 김도현 연구원이 제1저자로 참여했다. 연구팀은 “하드웨어적 공정 혁신과 AI 기반 신호 복원 소프트웨어 기술을 결합해 렌즈라는 초소형 폼팩터의 공간적 제약을 극복한 기술”이라고 설명했다.

연구를 총괄한 정임두 교수는 “별도의 컨트롤러 없이 인간의 시각 정보를 로봇 제어 신호로 직접 변환하는 고도화된 인간-기계 상호작용(Human-Robot Interaction, HRI) 시스템 구현이 가능함을 증명했다”며 “차세대 초경량 XR 인터페이스 장치로서 눈의 움직임만으로 다양한 전자 기기를 정밀하게 제어할 수 있다는 점에서, 증강현실 기반 산업용 로봇 원격 제어, 재난·재해 환경에서의 탐사 로봇 운용, 국방 분야의 무인체계 및 드론 조종, 의료 및 재활 지원 시스템, 스마트 모빌리티 인터페이스 등 다양한 분야로 확장될 수 있는 잠재력을 지닌다”고 밝혔다.

연구 결과는 재료 과학 분야 세계적 학술지 (Impact Factor: 19.0, JCR 상위 5%이내)인 ‘어드밴스드 펑셔널 머티리얼즈(Advanced Functional Materials)’에 3월 11일 게재되었으며, 최신 호 전면 표지 논문으로 선정되어 출판될 예정이다.

연구 수행은 과학기술정보통신부 한국연구재단과 정보통신기획평가원 및 산업통상자원부의 기술개발사업 지원으로 이뤄졌다.

(논문명: *Meniscus Pixel Printing for Contact-Lens Vision Sensing and Robotic Control*)

붙임: 연구결과개요, 용어설명, 그림설명, 연구자 이력사항. (끝)

연구 결과 개요

1. 연구배경

가상현실과 증강현실을 아우르는 확장현실(XR) 기술은 차세대 인터페이스로 주목받고 있으나, 기존 헤드셋 타입의 장비는 무게와 부피로 인해 장시간 사용 시 피로감이 크다는 단점이 있다. 이를 대체할 초경량 폼팩터로 스마트 콘택트렌즈가 제안되어 왔으나, 렌즈와 같은 곡면 기판에 미세 센서를 정밀하게 집적하는 것은 매우 까다롭다. 기존의 공정은 평면 기판에 최적화되어 있어 곡면 인쇄 시 기하학적 왜곡이 발생하며, 복잡한 다단계 공정은 사용자별로 상이한 안구 곡률에 대응하는 맞춤형 제작을 어렵게 만든다. 또한 렌즈라는 초소형 폼팩터의 물리적 면적 제약으로 인해 고해상도 구현을 위한 충분한 수의 센서를 배치하기 어렵다는 근본적인 난제가 존재한다.

2. 연구내용

본 연구에서는 **메니스커스 픽셀 프린팅(MPP)**¹ 기술을 고안함으로써 이러한 문제를 해결했다. 이 기술은 노즐 끝에 형성되는 액체의 표면장력을 이용해 잉크를 직접 기판에 전송하는 원리로 인쇄하므로 별도의 마스크를 요구하지 않는 단순한 공정만으로도 높은 설계 자유도와 위치 정확도를 확보할 수 있다. 이는 복잡한 다단계 공정을 거치지 않고도 사용자별 맞춤형 패턴을 즉각적으로 구현할 수 있는 높은 공정 범용성을 제공한다. 이를 통해 이를 통해 안정적으로 센싱이 가능한 200 μ m 크기의 **페로브스카이트 광검출기**² 배열을 수 초 이내로 빠르게 인쇄할 수 있으며, 곡면에서도 기하학적 왜곡 없는 정밀 패턴링을 구현했다. 또한, 콘택트렌즈의 좁은 면적으로 인한 센서 밀도 한계를 극복하기 위해 **초해상도 생성적 적대 신경망(SRGAN)**³ 모델을 도입했다. 이 AI 모델은 10 \times 10의 저해상도 센서 신호를 80 \times 80 고해상도 정보로 실시간 복원하도록 설계되었다. 특히 육안으로는 식별하기 어려운 저해상도 광학 패턴을 정교하게 재구성함으로써, 손글씨 숫자 데이터를 대상으로 97.2%의 높은 인식 정확도를 기록하며 정보 복원 능력을 입증했다. 아울러 약 0.03초의 빠른 추론 속도를 바탕으로, 회전하거나 이동하는 동적 패턴까지 지연 없이 실시간으로 복원하는 데 성공했다. 더 나아가 기기 소형화를 위해 센서 배열을 5 \times 5로 최소화한 극한의 환경에서도 SR 알고리즘을 적용해 9가지 안구 동작의 인식 정확도를 기존 88.4%에서 99.3%로 크게 향상시켰으며, 이를 통해 별도의 컨트롤러 없이 시선만으로 로봇 팔이 물건을 집어 옮기는 복잡한 작업을 성공

적으로 수행했다.

3. 기대효과

이번 연구를 통해 개발된 스마트 콘택트렌즈 시스템은 사용자의 안구 움직임만으로 로봇 팔을 실시간 원격 제어하는 고도화된 **인간-로봇 상호작용**⁴의 가능성을 입증했다. 이는 기존 평면 공정의 한계와 초소형 기기의 공간적 제약을 동시에 극복한 사례이다. 이러한 기술적 성과는 차세대 초경량 XR 인터페이스 장치뿐만 아니라, 신체 거동이 불편한 사용자를 위한 보조 공학 기기, 고위험 산업 현장의 로봇 원격 조종 등 정밀한 시각 기반 제어가 필요한 다양한 분야에 새로운 솔루션을 제공할 것으로 기대된다. 나아가 본 연구는 초소형 웨어러블 소자의 설계 자유도를 극대화하고 AI 기반 정보 복원 기술을 통해 시스템을 지능화함으로써, 차세대 지능형 웨어러블 디바이스의 구현과 기술적 완성도를 높이는 데 기여할 것으로 전망된다.

용 어 설 명

1. 메니스커스 픽셀 프린팅 (Meniscus Pixel Printing, MPP)

메니스커스 픽셀 프린팅은 미세 노즐과 기판 사이의 접촉을 통해 형성되는 메니스커스(Meniscus, 액체 표면장력에 의해 형성되는 곡면)를 활용해 잉크를 직접적으로 전달하는 인쇄 기술이다. 이 기술은 노즐이 기판과 닿을 때 메니스커스에 의해 형성되는 액체 기둥을 제어함으로써, 별도의 마스크나 복잡한 다단계 공정 없이도 미세한 픽셀 패턴을 즉각적으로 인쇄할 수 있다. 특히 노즐의 이동 경로를 자유롭게 제어할 수 있어 높은 설계 자유도와 위치 정밀도를 확보할 수 있다. 또한, 공정이 매우 단순하고 기판의 형태에 구애받지 않는 높은 범용성을 갖추고 있다. 덕분에 기존 공정으로는 불가능했던 평면 외의 다양한 곡면 기판 위에서도 기하학적 왜곡 없이 미세 소자를 안정적으로 제작할 수 있다. 이는 사용자의 안구 곡률에 완벽히 밀착되어야 하는 스마트 콘택트렌즈와 같은 특수한 형태의 차세대 웨어러블 기기 제조를 가능하게 하는 공정 기술이다.

2. 페로브스카이트 광검출기 (Perovskite photodetector)

페로브스카이트 광검출기는 빛을 전기 신호로 변환하는 효율이 매우 뛰어난 차세대 소재인 페로브스카이트를 활용한 광전 소자이다. 페로브스카이트는 우수한 가시광선 흡수율, 조정 가능한 밴드갭(Bandgap), 긴 전하 운반체(Carrier) 확산 거리 등 독보적인 광학적 특성을 지니며, 작동 중 발열과 전력 소모가 적어 차세대 광전 분야의 핵심 소재로 각광받고 있다. 특히, 액체 상태의 잉크로 제작하여 인쇄하는 용액 공정이 가능해 제조 과정이 경제적이고 간편하다는 강력한 장점이 있다. 이러한 공정 편의성과 높은 효율성을 바탕으로 고효율 태양전지, LED, 이미지 센서 등 차세대 광반도체 산업 전반에서 가장 활발하게 연구되고 있는 신소재이다.

3. 초해상도 생성적 적대 신경망 (Super-Resolution Generative Adversarial Network, SRGAN)

초해상도 생성적 적대 신경망은 저해상도 이미지를 고해상도로 변환하는 초해상도 기술에 인공지능 모델인 생성적 적대 신경망을 접목한 기술이다. 데이터를 생성하는 생성기와 이를 실제 데이터와 비교해 진위 여부를 판별하는 판별기가 서로 경쟁하며 학습함으로써, 단순히 픽셀을 늘리는 보간법을 넘어 손실된 세부 정보를 정교하게 복원할 수 있다. 특히, 단순히 픽셀 단위의 오차를 최소화하는 것을 넘어 사람이 시각적으로 인지하는 고차원적 특징의 차이를 줄일 수 있는 시각적 손실

(Perceptual loss)을 활용하는 것이 특징이다. 이를 통해 인공지능은 데이터의 단순한 수치적 일치를 넘어, 실제 고해상도 이미지와 시각적으로 구분이 어려울 정도로 선명한 질감과 세밀한 특징까지 복원할 수 있다.

4. 인간-로봇 상호작용 (Human-Robot Interaction, HRI)

인간-로봇 상호작용은 인간과 로봇이 정보를 교환하며 상호 이해를 바탕으로 특정 과업을 수행하기 위해 협력하는 기술 체계이다. 기존의 HRI는 주로 버튼 조작, 음성 명령, 제스처 인식 등을 통해 물리적인 제어 신호를 전달해 왔으나, 최근에는 시선(Eye-tracking)이나 뇌파와 같은 생체 신호를 활용해 인간의 의도를 더욱 직관적으로 전달하는 고도화된 인터페이스 연구가 활발히 진행되고 있다. 사용자의 인지적 의도를 로봇의 동작 신호로 실시간 변환함으로써, 보다 자연스럽게 정밀한 인간 중심의 로봇 제어 환경을 구축하는 핵심 기술이다.

그림 설명

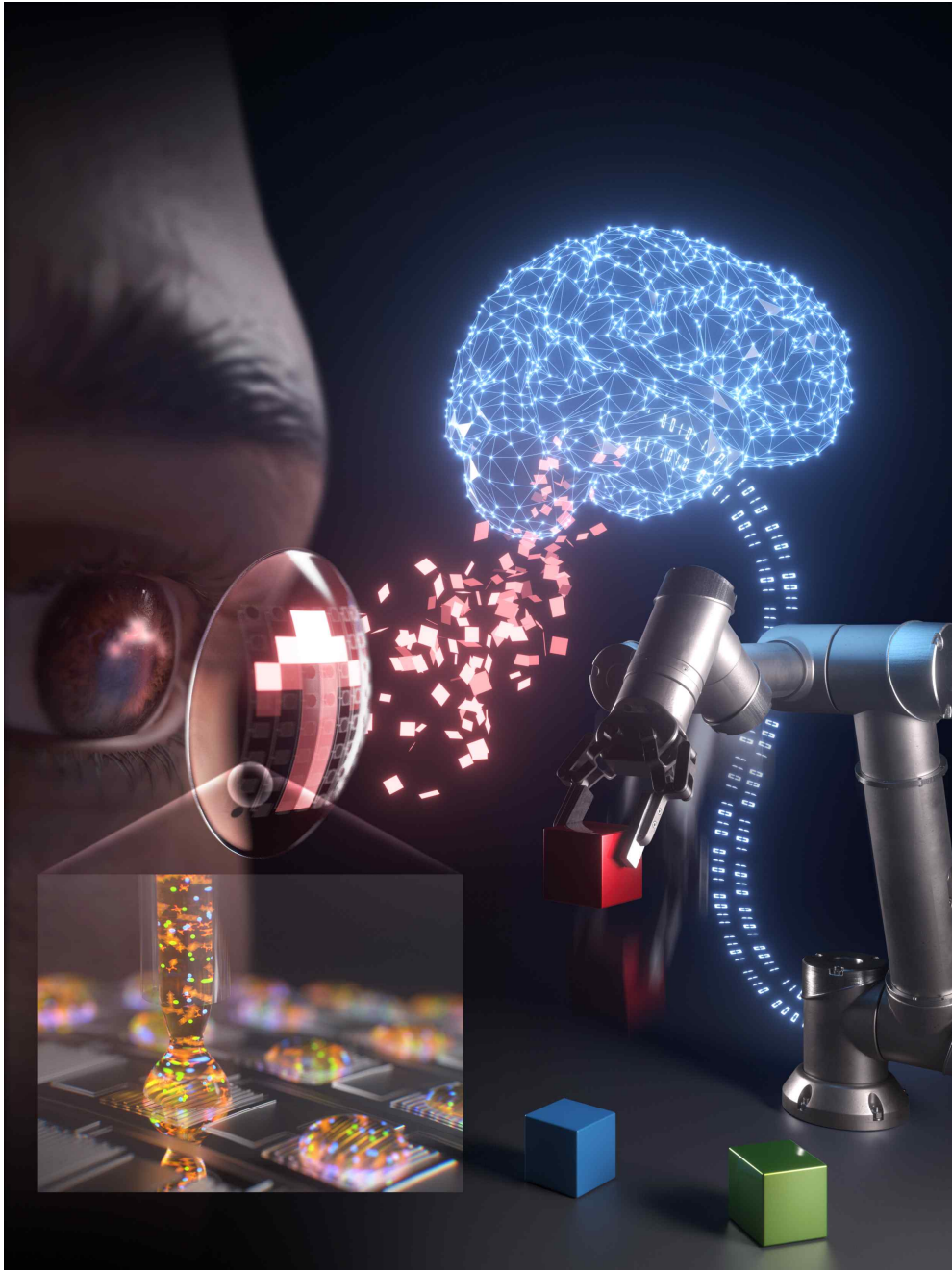


그림 1. 눈동자의 움직임으로 로봇을 제어하는 콘택트렌즈 개념도

콘택트렌즈에 집적된 빛 감지 센서가 눈에 들어오는 빛 분포를 읽어 시선 방향을 추정하고, 이를 인공지능으로 고해상도 보정해 로봇 팔 제어 신호로 변환하는 과정을 나타낸다. 삽도(inset)는 센서 프린팅에 적용된 MMP기술이다.

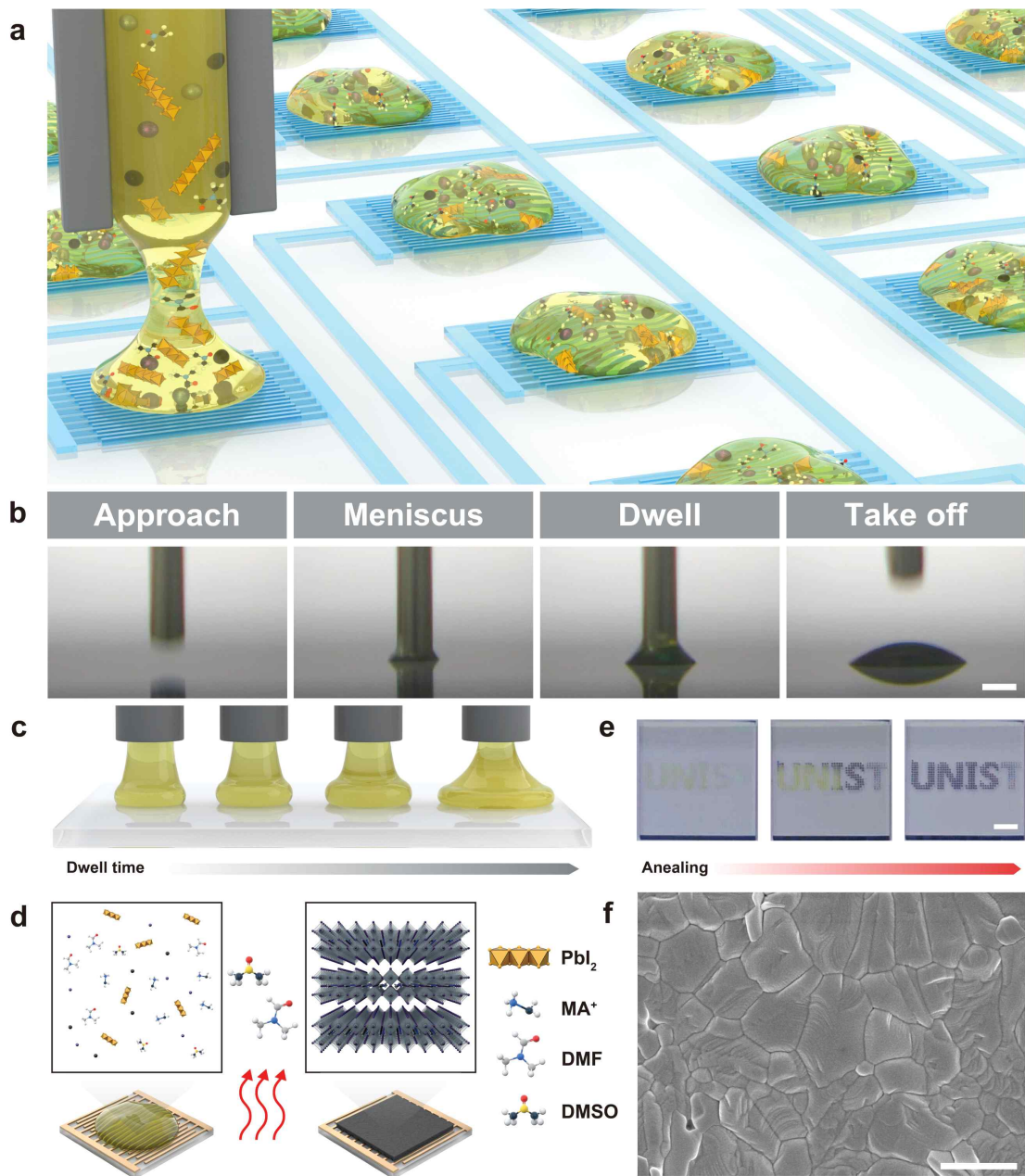


그림 2. MPP 공정의 원리와 페로브스카이트 픽셀 패터닝 공정

a-b. MPP 공정 개략도 및 메커니즘

c. 공정 변수(ex. 체류 시간)에 따른 픽셀 크기 제어 개략도

d-e. MPP 공정을 통해 인쇄된 페로브스카이트 픽셀의 결정화 과정 개략도 및 실제 형성 예시

f. 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 페로브스카이트 결정 구조

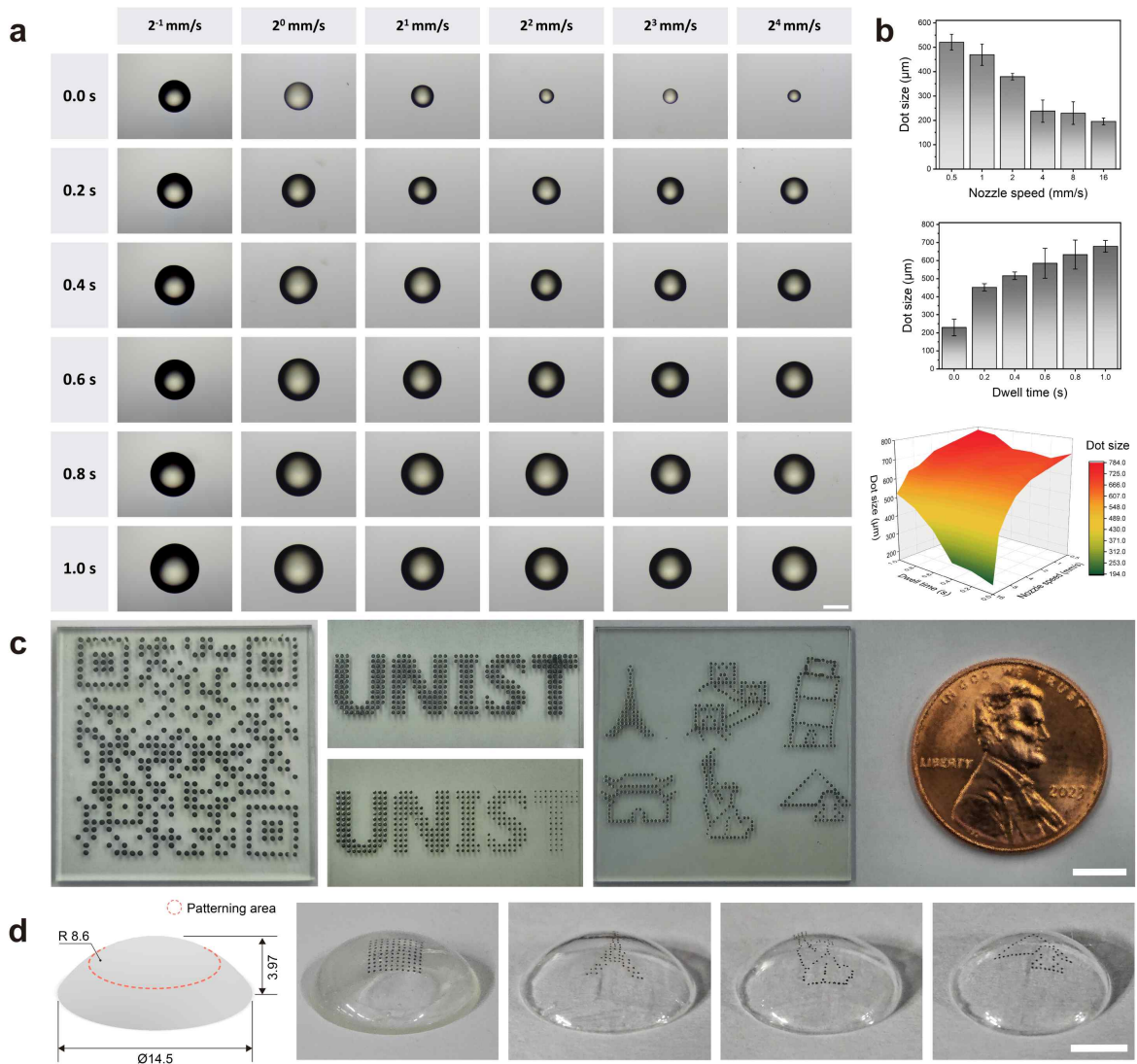


그림 3. 공정 변수에 따른 MPP 픽셀 제어 및 패터닝 성능

a-b. 노즐 이동 속도 및 체류 시간 제어를 통한 픽셀 크기 제어 특성화

c-d. 평면 및 곡면에서의 다양한 형태의 페로브스카이트 픽셀 배열 패터닝 예시

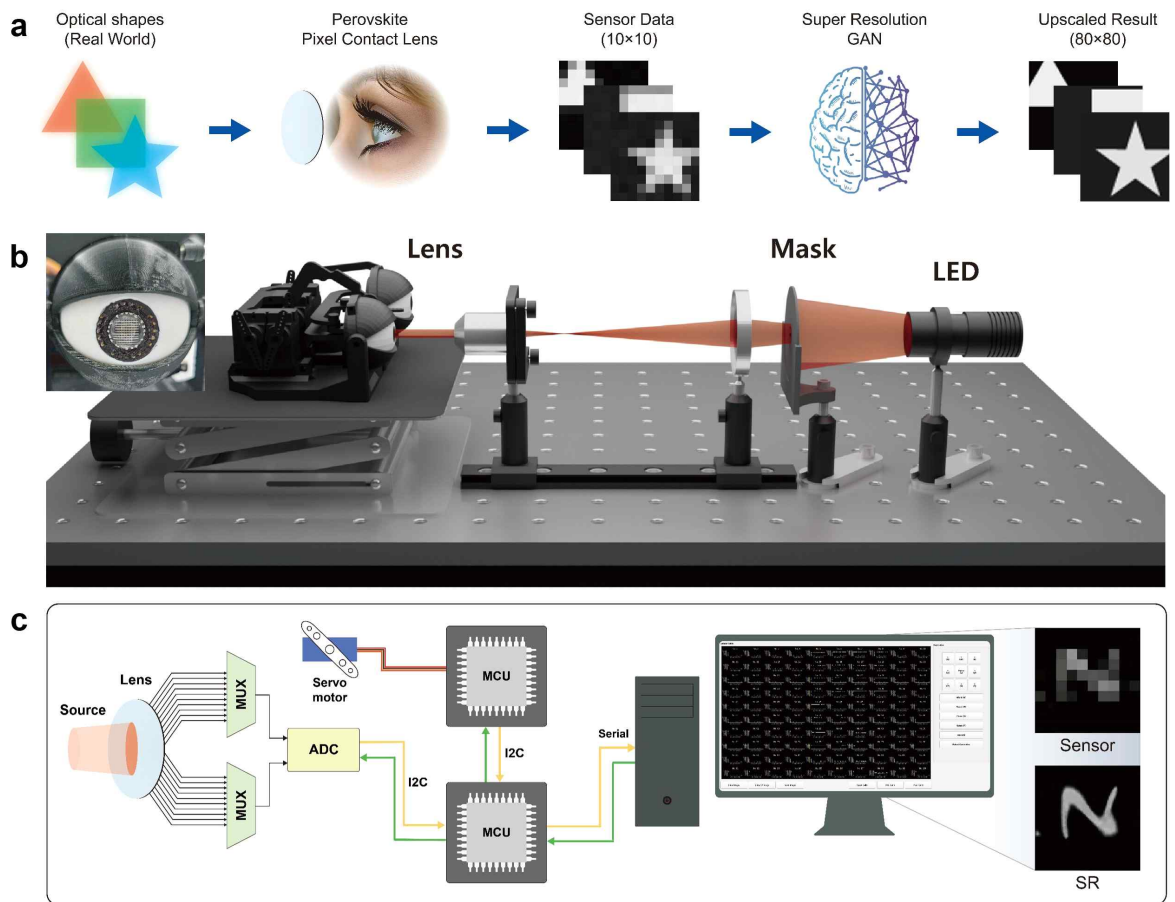


그림 4. AI 스마트 콘택트렌즈 시스템 개략도

a. AI 기반 초해상도 센싱 시스템 데이터 흐름도

b-c. 스마트 콘택트렌즈 검증을 위한 테스트베드 구성 개략도

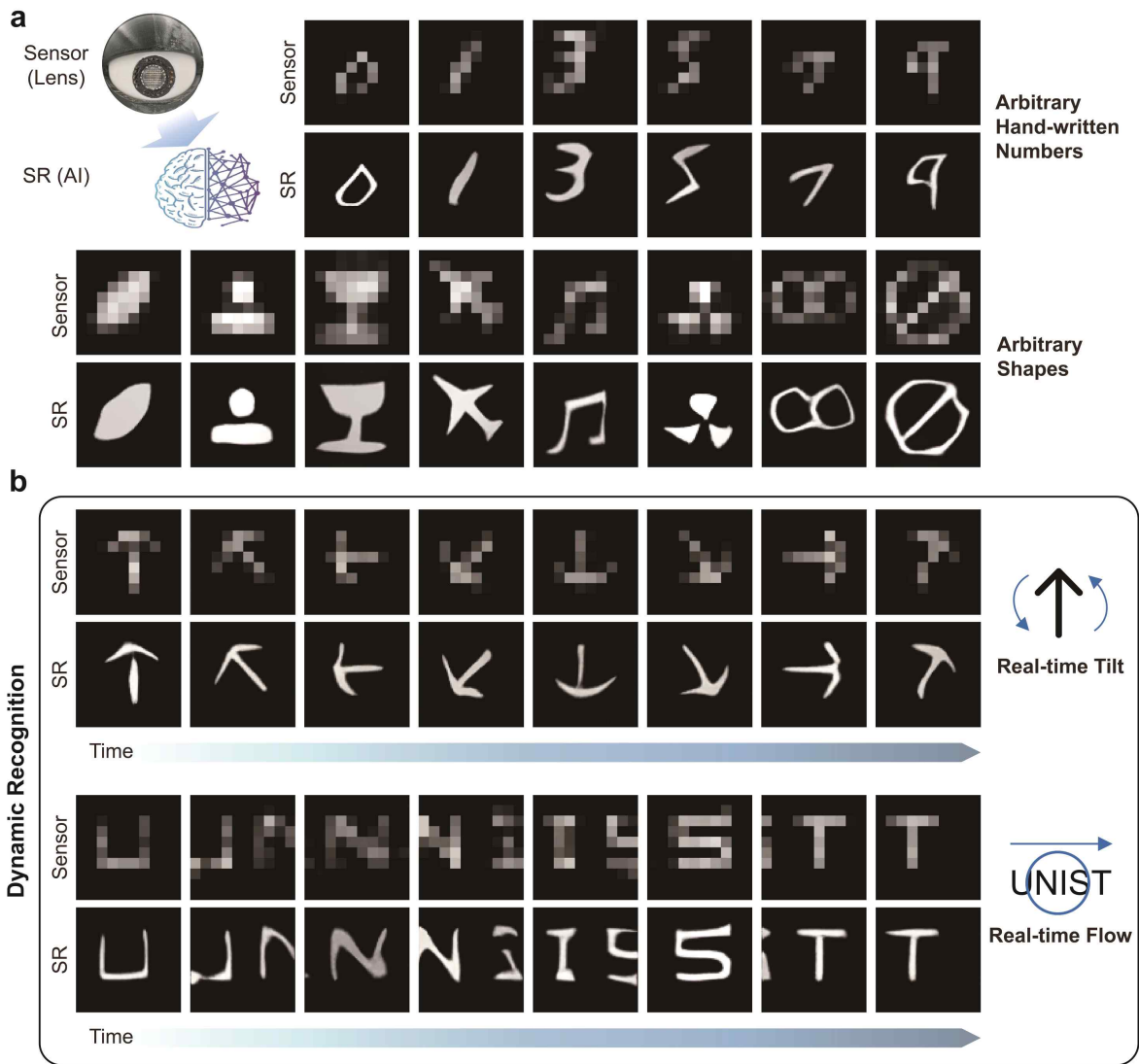


그림 5. 딥러닝 기반 SR 알고리즘을 통한 저해상도 광학 데이터의 실시간 고해상도 복원

- a. 임의의 광 패턴에 대한 센싱 데이터(10×10)와 SR 적용 결과(80×80) 비교
- b. 실시간으로 변화하는 광 패턴에 대한 센싱 데이터(10×10)와 SR 적용 결과(80×80) 비교

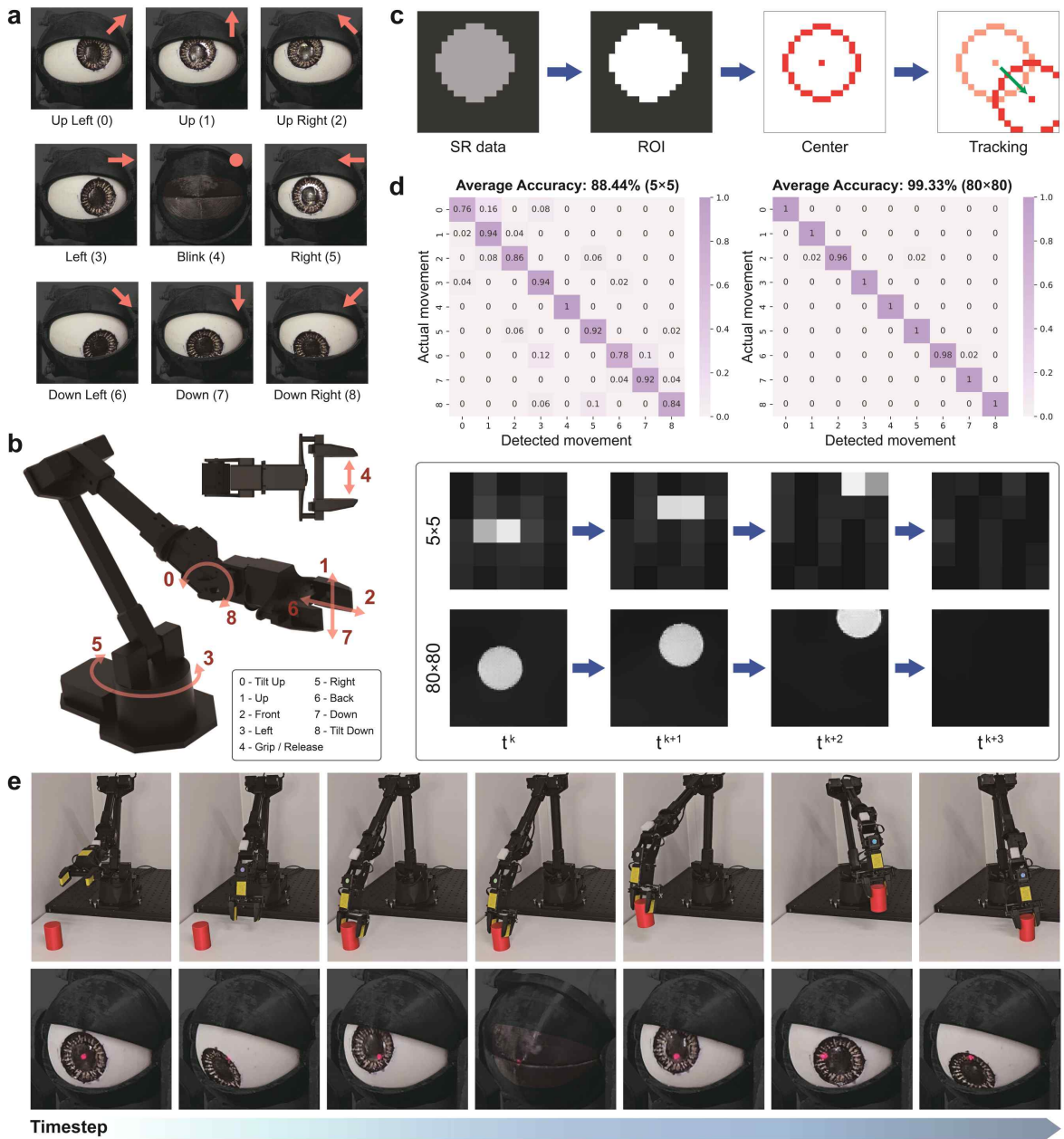


그림 6. 스마트 콘택트렌즈를 통한 시선 감지 및 로봇 팔 원격 제어 시연
a-c. 동공과 로봇 팔의 움직임 동기화 설정 및 시선 추적 알고리즘 개략도
d. SR 적용 전(5×5)과 후(80×80)의 시선 변화 분류 결과 및 데이터 예시
e. 동공 움직임에 따른 로봇 팔 제어 시연 결과

정임두 교수 이력사항

1. 인적사항

- 소 속 : 울산과학기술원(UNIST) 기계공학부
- 전 화 : 052-217-3060
- 이메일 : idjung@unist.ac.kr



2. 학력

- 2011년: 포항공과대학교 기계공학과 학사
- 2016년: 포항공과대학교 기계공학과 박사

3. 경력사항

- 2016년~2017년 : 난양 공과대학 박사 후 연구원
- 2017년~2020년 : 한국재료연구원(KIMS) 선임연구원
- 2020년: 한동대학교 기계제어공학과 조교수
- 2020년~2024년: 울산과학기술원 기계공학과 조교수
- 2024년~현재: 울산과학기술원 기계공학과 부교수
- 2024년~현재: 울산과학기술원 인공지능대학원 겸임교수

4. 전문 분야 정보

- 적층제조 분야 (3D printing for Metal/Electronic Materials)
- 인공지능응용 분야 (제조, 의료, 재료)
- 자가발전 IoT 시스템을 위한 나노소재 개발

5. 연구지원정보

- 본 연구는 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 지원을 받아 한국연구재단의 지원(No. RS-2023-00211636, No. RS-2025-2453204), 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. RS-2020-II201336, 인공지능대학원지원(울산과학기술원))과 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. RS-2023-00240918)을 받아 수행된 연구임.