

GIST, 3D 물체 실시간 추적 기술 개발 ... 카메라 하나로 산업 현장 원격 지원

- 기계로봇공학과 고광희 교수팀, 단일 RGB 카메라만으로 물체의 3D 위치와 회전 방향(6-DoF) 정밀 추정하는 기술 개발... 조명·배경 변화에도 안정적 추적 가능
- 스마트 글래스·카메라·프로젝터 연계 MR 원격 협업 시스템으로 산업 현장 활용 가능해 제조 교육, 원격 A/S 등 작업 효율과 정확도 향상 기대... 국제학술지 《Computers in Industry》 게재

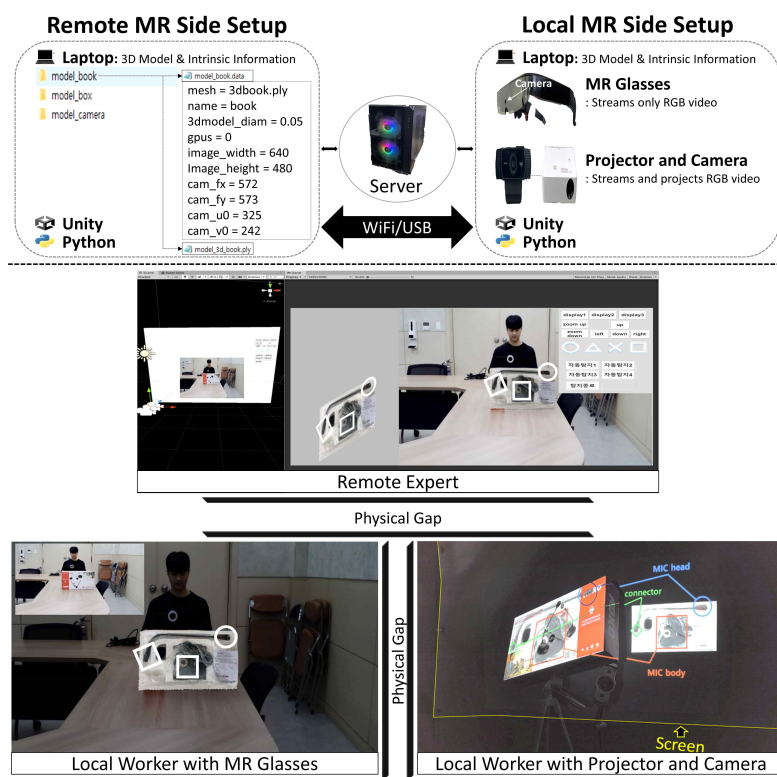


▲ (위줄 왼쪽부터) 고광희 교수(교신저자, GIST 기계로봇공학과), 오인영(제1저자, GIST 기계로봇공학과), 장길상(제2저자, GIST 기계로봇공학과), 송진호(제3저자, 한남대 AI 융합학과), 손문구(제4저자, 소프트힐스), 김대운(제5저자, KT), 윤준상(제6저자, GIST 기계로봇공학과)

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계로봇공학과 고광희 교수 연구팀이 단일 RGB 카메라*만으로 물체가 3차원 공간에서 어디에 있고 어떻게 기울어져 있는지(6 자유도(6-DoF)*)를 정확히 파악하는 기술을 구현하고, 이를 기반으로 제조·정비·교육 현장에서 활용 가능한 혼합현실(MR) 원격 협업 프레임워크를 개발했다고 밝혔다.

* **RGB 카메라**: 적(Red), 녹(Green), 청(Blue) 세 가지 색상 채널을 이용해 컬러 영상을 촬영하는 카메라로, 각 픽셀의 R, G, B 값을 기록해 사람 눈에 보이는 이미지를 생성한다. 컴퓨터 비전, 로봇 비전, 증강현실 등에서 객체 인식, 추적, 3D 재구성 등에 활용된다.

* **6-DoF(6 Degrees of Freedom)**: 물체가 3차원 공간에서 가질 수 있는 여섯 가지 독립적인 운동 자유도를 의미하며, 위치 이동과 회전으로 나뉜다. 위치 이동은 X, Y, Z 세 축을 따라 좌우·상하·앞뒤로 움직이는 자유도를, 회전은 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw) 세 축을 중심으로 회전하는 자유도를 각각 뜻한다. 즉, 6-DoF는 물체가 공간에서 어디에 위치하고 어떤 방향으로 회전하는지를 동시에 정의할 수 있는 개념이다.



Synchronized 3D Spatial Data Between a Remote Expert and a Local Worker

▲ **MR 원격 협업 프레임워크 개요(시스템 아키텍처)**. 원격 전문가-현장 작업자 간 3D 공간 데이터 동기화, 주석 전송, 디바이스별 렌더링 흐름을 한 눈에 보여준다. 물체좌표계 정렬이 핵심.

현장에서 원격으로 작업을 지원하려면, 전문가가 보내는 가상 표시나 안내선이 실제 물체 표면에 정확히 맞아떨어지는 것이 중요하다. 이러한 정합을 위해 기존 MR 원격 협업 시스템*은 물체에 마커(tag)를 부착하거나 깊이 센서를 설치해 물체의 좌표계를 확보하는 방식이 주로 사용됐다.

하지만 이 방식은 마커를 고정·재설치해야 하는 번거로움이 크고, 깊이 센서는 조명·배경 변화나 장비 비용 문제로 실제 산업 현장에서 적용하기 어렵다는 한계가 있었다.

특히 RGB 카메라 기반 추정 기술은 발전해 왔지만, 조명·배경 변화, 가림 등이 반복되는 실제 환경에서는 안정성과 실시간성을 동시에 확보하기 어려웠다.

* **MR 원격 협업 프레임워크** : 원격 전문가와 현장 작업자가 동일한 물체 좌표계를 공유하여, 주석이나 지시, 작업 절차 등을 물체 표면에 정확히 정렬해 투영함으로써 실시간 협업을 가능한 시스템이다.

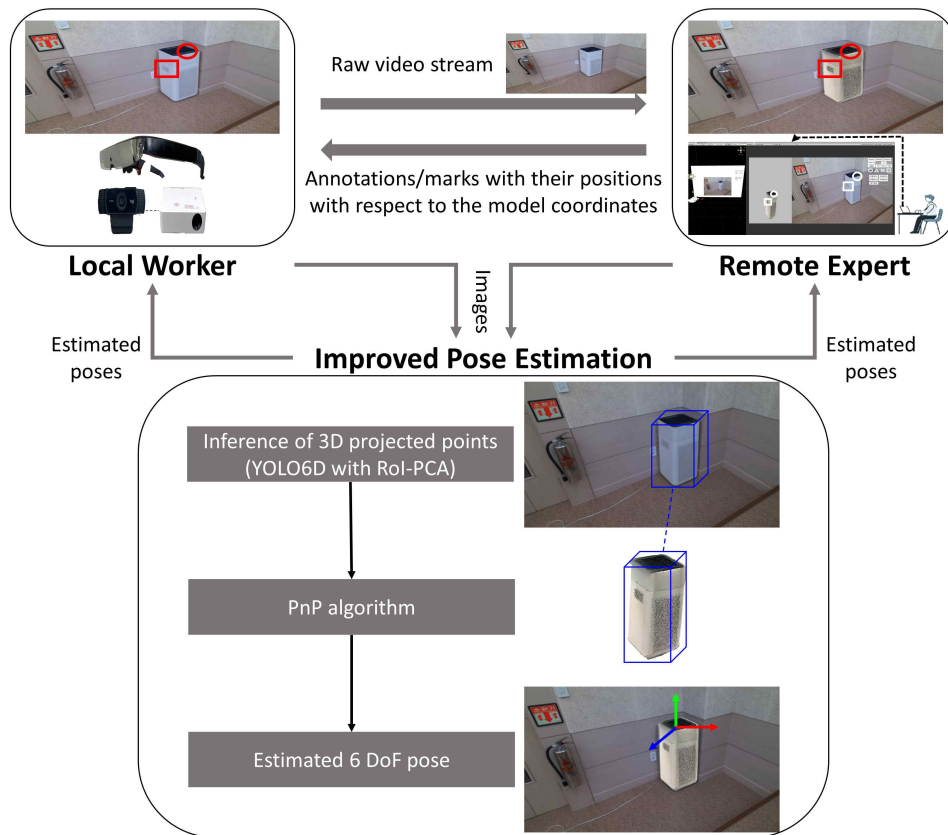
연구팀은 이러한 한계를 해결하기 위해, 조명이나 배경 변화에도 흔들리지 않고 물체를 안정적으로 추적할 수 있는 새로운 접근법을 적용했다. 기존 YOLO6D* 기반 키 포인트(물체의 기준점) 추정 과정에 'RoI-PCA'라는 색상 처리 기법을 추가한 것이다.

RoI-PCA는 이미지 전체가 아니라 물체가 있는 부분만 선택적으로 색상을 변형해 학습함으로써, 물체 고유 색상은 유지하면서도 조명과 배경 변화로 인한 오차를 줄여 정확도를 높이는 방법이다.

이를 통해 **RGB 카메라 하나만으로도 물체의 위치와 회전 방향을 안정적으로 파악**할 수 있게 되었다.

* **YOLO6D**: 2D 이미지에서 3D 물체의 8개 코너와 중심점(centroid)을 예측한 뒤, PnP(Perspective-n-Point) 알고리즘을 통해 6-DoF 자세를 계산하는 간접 방식 포즈 추정 네트워크이다.

* **RoI-PCA(Region of Interest Principal Component Analysis, 물체 관심영역 색공간 증강)**: 이미지 전체가 아닌 물체 관심영역(RoI)에만 PCA 기반 색공간 변동을 적용하는 데이터 증강 기법이다. 이를 통해 물체 고유 색상 특성은 유지하면서 배경과 조명 변화로 인한 영향을 최소화하고, 키포인트 예측의 안정성을 향상시킨다.



▲ **정보 흐름도 및 6-DoF 추정 파이프라인**. 단일 RGB 입력 → YOLO6D with RoI-PCA 기반 키포인트 추정 → PnP 기반 6 DoF 자세 추정 과정. 로컬/원격 양방향 정보 흐름을 표시.

연구팀은 개발된 자세 추정 기술을 실제 산업 현장에서 활용할 수 있도록 MR 원격 협업 시스템으로 통합했다.

현장 작업자의 스마트 글래스 또는 카메라-프로젝터 장비에서 촬영된 영상이 전문가에게 실시간으로 전송되면, 전문가가 작성한 주석·지시 사항이 분석된 물체 좌표계에 정확히 정렬되어 다시 현장 장비에 투영된다.

스마트 글래스 사용 시에는 사용자 간 시차로 발생할 수 있는 미세한 정렬 오차를 보정할 수 있는 **간이 눈보정 UI***를 적용했고, 카메라-프로젝터 시스템에는 복잡한 표면에도 가상 정보를 안정적으로 투영할 수 있도록 연속적으로 하나씩 바뀌는 패턴을 활용한 보정 기술(**Gray code 패턴 기반 캘리브레이션***)을 활용해 물체의 복잡한 표면에서도 안정적인 정보 투영이 가능하도록 했다.

* **눈보정 UI(Eye-Alignment User Interface)** : MR(Mixed Reality) 환경에서 스마트 글래스 사용 시, 사용자 간 시차(parallax)로 발생하는 미세한 시각적 오차를 보정하기 위해 제공되는 인터페이스다. 사용자가 눈 위치나 시선 기준을 간단히 조정하면, 가상 정보가 정확히 물체 표면에 정렬되도록 실시간 보정할 수 있다.

* **Gray code 패턴 기반 캘리브레이션** : 프로젝터-카메라 시스템에서 물체 표면의 정확한 위치와 정렬을 위해 사용되는 방법으로, 연속적으로 하나의 비트만 변하는 Gray 코드 패턴을 순차적으로 투사하고 카메라로 촬영하여 각 픽셀의 대응 좌표를 계산하는 기술이다. 이를 통해 조명 변화나 복잡한 표면에서도 안정적인 정합과 3D 좌표 추출이 가능하다.

연구팀은 대표적인 테스트 데이터인 **LINEMOD 벤치마크***와, 색상과 거리 정보를 함께 담은 자체 3D 데이터(RGB-D 카메라 촬영)를 활용해 기술 성능을 검증했다.

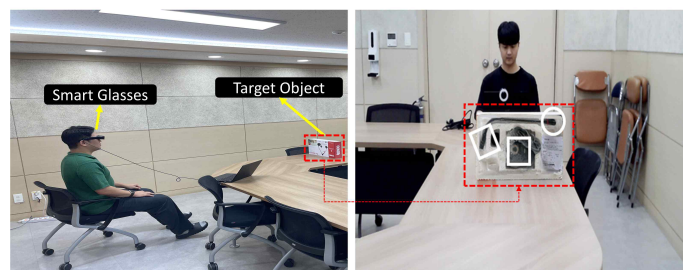
새 기법(RoI-PCA)을 적용한 모델은 물체의 위치와 회전 방향을 얼마나 정확하게 잡는지를 평가하는 모든 기준(2D 재투영 오차, ADD, 5 cm·5° 기준* 등 산업용 자세 추정 평가 지표)에서 기존 대비 안정적 성능 향상을 보였다.

실제 산업 환경과 유사한 소형 박스, 공기청정기 버튼 등을 대상으로 한 실험에서도 조명 변화, 배경 복잡도, 주변 물체 등장에도 흔들림 없이 가상 표시가 정확히 정렬되는 것을 확인하며 현장 데모를 성공적으로 수행했다.

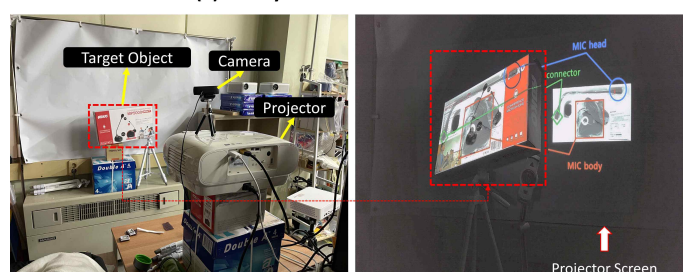
* **LINEMOD 벤치마크** : 3차원 물체 인식 및 6-DoF 자세 추정 성능을 평가하기 위해 널리 사용되는 데이터셋 및 평가 기준이다. 다양한 조명, 배경, 시점에서 촬영된 RGB-D 이미지와 3D CAD 모델을 포함하며, 연구자들이 객체 검출, 키포인트 추출, 자세 추정 알고리즘의 정확도와 강인성을 비교하는 데 활용된다.

* **RoI-PCA** : 이미지 전체가 아니라 대상 물체의 영역(RoI)에만 PCA 색채 변동을 적용해, 물체 고유색 특성을 프레임 간 일관되게 유지하면서 배경·조명 영향은 최소화하는 색공간 증강 방법이다.

* **2D 재투영 오차**는 예측된 6-DoF 포즈로 3D 모델 점을 이미지 평면에 투영했을 때 실제 위치(GT)와의 픽셀 단위 차이를 기준으로 정확도를 평가하는 지표이며, **ADD(Average Distance of Model Points)**는 예측 포즈 기준으로 모델 표면 점들과 실제 위치 간 평균 유클리드 거리를 계산해 3D 정합 오차를 측정하는 방법이다. 또한 **5 cm·5° 기준**은 이동 오차가 5 cm 이하이고 회전 오차가 5° 이하일 때를 정답으로 간주하는 고정밀 평가 기준으로 사용된다.



(a) MR System with Smart Glasses



(b) MR System with Camera and Projector

▲ 멀티 디바이스 MR 원격 협업 데모: 스마트 글래스와 카메라-프로젝터 기반 구현. (a) MR System with Smart glasses: 스마트 글래스를 착용한 환경에서 단일 RGB 입력으로 추정된 6-DoF 자세를 이용해, 대상 물체(Target Object) 위에 원·사각 안내 표식이 정밀 정렬되어 보이는 예시. 확대 인셋은 사용자의 시야에서 주석이 물체 좌표계에 맞춰 정확히 겹쳐지는 모습을 보여준다. (b) MR System with Camera and Projector: 외부 카메라가 대상 물체의 6-DoF를 추정하고, 캘리브레이션된 프로젝터가 동일 주석을 실물 표면(프로젝터 스크린)에 정합 투영하는 장면. 카메라-프로젝터 정합은 그레이코드 기반 보정으로 유지되며, 복잡한 배경에서도 안정적인 원격 지시 시각화가 가능함을 시연한다.

고광희 교수는 “이번 기술은 **마커나 깊이 센서를 설치할 필요가 없어 현장 적용 비용과 유지보수 부담을 크게 줄일 수 있다**”라며, “제조 현장에서 새로 투입된 작업자가 장비와 공정을 빠르게 익혀 안전하고 정확하게 작업할 수 있도록 돕는 교육 과정(제조 라인 온보딩), 원격 A/S, 품질검사, 실습 교육 등 **다양한 분야에서 작업 오류를 줄이고 처리 시간을 단축하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다**”고 말했다.

연구팀은 앞으로 일부 데이터에만 정답 정보를 제공하고 나머지는 스스로 학습하는 방법(준지도 학습)과, 여러 작업 현장의 데이터를 직접 공유하지 않고도 동시에 학습하는 방법(연합학습)을 결합해 **조명·배경 등 환경이 다른 여러 산업 현장에서도 물체 위치와 방향을 정확히 추정할 수 있는 기술(포즈 추정 기술)로 확장할 계획**이다.

GIST 기계로봇공학과 고광희 교수가 지도하고 오인영 박사과정생이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·정보통신기획평가원(IITP) 및 산업통상자원부·한국산업기술진흥원(KIAT) 산업혁신인재성장지원사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《컴퓨터 인 인더스트리(Computers in Industry)》에 2025년 11월 20일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Computers in Industry
IF 9.1 (2024 Journal Citation Reports (Clarivate Analytics, 2025))
- 논문명 : A Mixed Reality-based Remote Collaboration Framework Using Improved Pose Estimation

- 저자 정보 : 오인영(제1저자, GIST 기계로봇공학과), 장길상(제2저자, GIST 기계로봇공학과), 송진호(제3저자, 한남대학교 AI 융합학과), 손문구(제4저자, 소프트힐스), 김대운(제5저자, KT), 윤준상(제6저자, GIST 기계로봇공학과), 고광희(교신저자, GIST 기계로봇공학과)