

“무중력 우주정거장에서도 회전 오차는 단 1.43°”

GIST-NASA, 3차원 목표 지점을 정확히 찾아가는 우주로봇 방향 제어 기술 개발

- GIST 기계로봇공학과 김표진 교수팀, NASA 에임스 연구센터와 함께 위·아래 구분 없는 우주정거장에서도 방향을 잃지 않는 로봇 나침반 기술 개발
- 실제 우주 환경을 가상으로 재현한 '디지털 트윈' 기술과 '절대 자세' 추정 통해 정밀한 제어 실현... 우주뿐 아니라 공항병원창고 등 실내 공간에서도 자율 로봇 활용 기대
- IEEE 국제 우주임무 정보기술 및 우주컴퓨팅 학술대회(SMC-IT/SCC 2025)와 연계해 열린 '제2회 우주 로봇 워크숍(2nd Space Robotics Workshop)'에서 발표



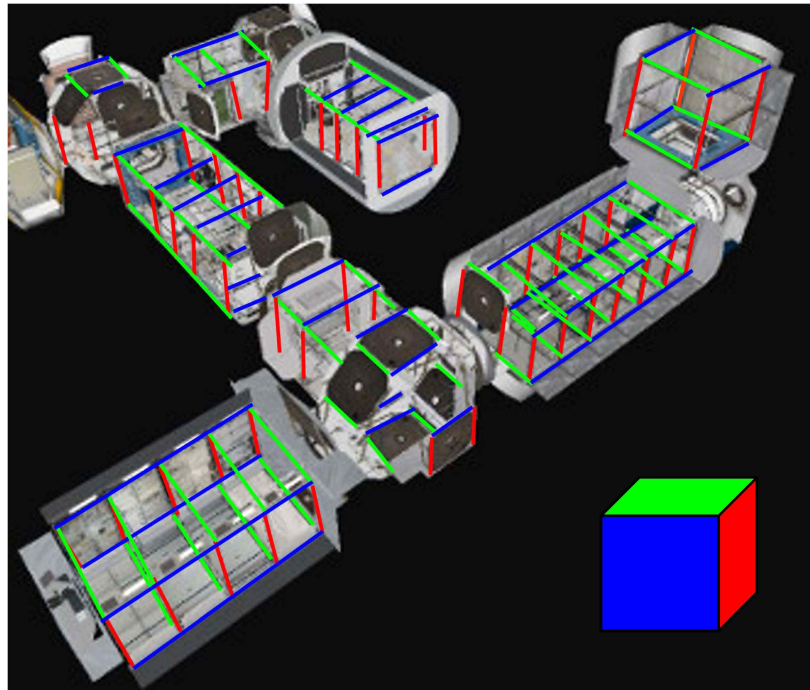
▲ GIST 기계로봇공학과 김표진 교수 연구팀과 미국 항공우주국(NASA) 에임스 연구센터(Ames Research Center) 공동 연구진이 워크숍 종료 후 기념촬영을 하고 있다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계로봇공학과 김표진 교수 연구팀이 미국 항공우주국(NASA)과의 공동연구를 통해, 국제우주정거장(ISS, International Space Station)과 같은 복잡한 환경에서도 로봇이 방향을 잃지 않고 안정적으로 움직일 수 있도록 돕는 '디지털 트윈' 기반 시각 나침반 기술'을 개발했다고 밝혔다.

이번 연구는 김표진 교수 연구팀이 NASA 연구팀과 함께 올해 3월 세계 최초로 구축·공개한 ISS 실내 자율 항법용 데이터세트 '애스트로비(Astrobeet)*'를 활용한 후속 성과다. 연구팀은 해당 데이터세트를 기반으로 실제 우주 환경과 유사한 조건에서 실험을 진행해 기술의 정확성과 실효성을 입증했다.

* **디지털 트윈(Digital Twin)**: 현실 세계의 물리적 시스템이나 공간(예: 우주정거장, 도시, 공장 등)을 가상 공간에 실시간 데이터 기반으로 정밀하게 복제·모사한 디지털 모델이다. 이를 통해 실제 시스템의 상태를 원격에서 모니터링하고, 가상의 환경에서 다양한 시뮬레이션이나 예측을 수행할 수 있어 유지보수, 운영 최적화, 위험 분석 등에 활용된다. 우주 분야에서는 우주정거장 내부 환경, 로봇의 움직임, 장비 상태 등을 디지털 트윈으로 구현해 임무의 안전성과 효율성을 높이는 데 기여하고 있다.

* **에스트로비(Astrobee)**: 미국 NASA가 개발한 국제우주정거장(ISS) 내부 전용 자율 비행 로봇으로, 무중력 공간을 자유롭게 이동하며 실험 보조, 장비 모니터링, 물품 운반 등의 임무를 수행한다. 소형 큐브 형태로 설계된 에스트로비는 내장된 센서와 카메라를 통해 환경을 인식하고, 원격 조작 또는 자율 주행을 통해 우주비행사들의 작업을 지원한다. 디지털 트윈 기술과 연계해 로봇의 동작을 가상 공간에서 시뮬레이션하거나, ISS 내부 상황을 정밀하게 재현하는 데도 활용되고 있다.



▲ 국제우주정거장(ISS)은 맨해튼 월드(MW) 가정을 만족하는 대표적인 사례 중 하나로, 세 가지 주요한 수직 방향(직교 방향)이 빨강, 초록, 파랑으로 시각화되어 있다.

ISS는 미세중력 환경으로 위아래 구분이 없어 로봇이 방향을 인식하고 길을 찾기 어렵다.

특히 무중력 상태에서 운용되는 에스트로비 로봇은 제자리에서 전후좌우로 자유롭게 회전하는 움직임이 빈번하여 기존의 시각 기반 항법 기술로는 방향 인식에 실패하는 경우가 많았다.

이러한 문제를 보완하기 위해 최근에는 건물 구조가 수평·수직으로 정렬돼 있다는 가정에 기반한 '맨해튼 월드(Manhattan World)' 모델*처럼 공간의 구조적 규칙성을 활용하는 방식이 사용되고 있다.

그러나 ISS 내부는 설비와 부유 물체가 복잡하게 얽혀 있어 선이나 벽과 같은 구조적 특징이 가려지거나 흐려지는 경우가 많아 정확한 인식이 어렵다.

* **맨해튼 월드(Manhattan World) 모델**: 건물이나 실내 구조물이 대부분 수평·수직 방향으로 정렬돼 있다는 가정에 기반한 공간 구조 모델로, 로봇의 위치 인식이나 컴퓨터 비전 분야에서 널리 활용된다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 ‘디지털 트윈’ 기술로 실내 3차원 공간의 방향 지도를 구축하고, 이를 활용해 우주 로봇이 누적 오차 없이 절대적인 자세(Drift-Free & Absolute Orientation)*를 정확히 측위할 수 있는 새로운 기법을 개발했다.

핵심 원리는 실제 촬영 영상에서 감지된 구조적 선을 디지털 트윈 모델과 비교·검증해 혼동되거나 불필요한 선을 제거하고, 신뢰할 수 있는 구조만을 선별하는 것이다.

* 절대적인 자세(Drift-Free & Absolute Orientation): 로봇이 시간이나 이동 거리에 관계없이 자신의 방향(자세)을 정확하게 인식하고 유지할 수 있는 능력을 의미한다. 일반적인 시각 기반 항법은 시간이 지날수록 누적되는 오차(드리프트)로 인해 방향 감각이 흐려질 수 있지만, 절대적인 자세 추정 기법은 외부 기준 없이도 이러한 누적 오차 없이 정확한 방향을 파악할 수 있어, 특히 GPS가 없는 실내나 우주 환경처럼 복잡하고 제한된 공간에서 매우 중요한 기술로 평가된다.

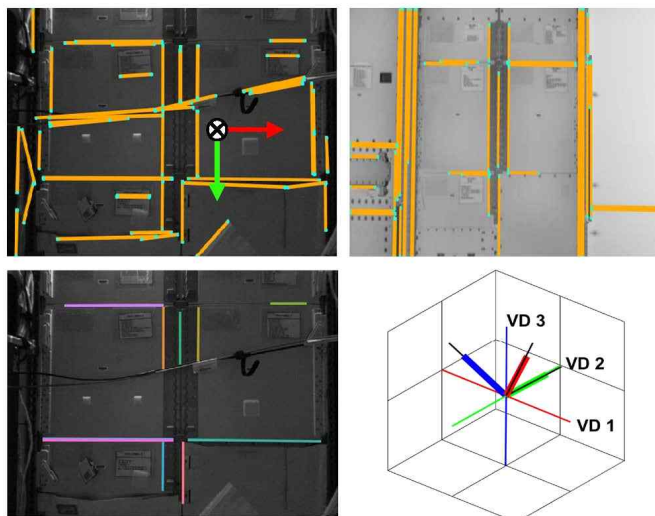
우주 로봇은 이렇게 지능적으로 선별된, 신뢰할 수 있는 선과 평면만을 활용해 3차원 공간에서 안정적으로 방향을 정확히 추적할 수 있다.

이를 통해 향후 우주 로봇은 물론, 복잡한 실내 환경에서도 정확하고 경량화된 자율 비행이 가능한 핵심 기술을 확보하게 됐다.

연구팀은 GIST-NASA 공동연구로 세계 최초 구축·공개한 ISS 자율비행 로봇용 데이터세트를 활용한 실험을 통해 이 기술의 우수성을 입증했다.

이 실험에서 로봇의 회전 정확도를 평가하는 대표적 지표인 ‘절대 회전 오차(Absolute Rotation Error, ARE)*’는 평균 1.43°에 불과한 것으로 나타나 이 기술이 정밀한 자세 제어나 탐사·작업에 적합하다는 것을 보여주었다. 또한 프레임당 약 20밀리초(0.02초)의 연산 속도로 실시간 적용 가능성도 확인했다.

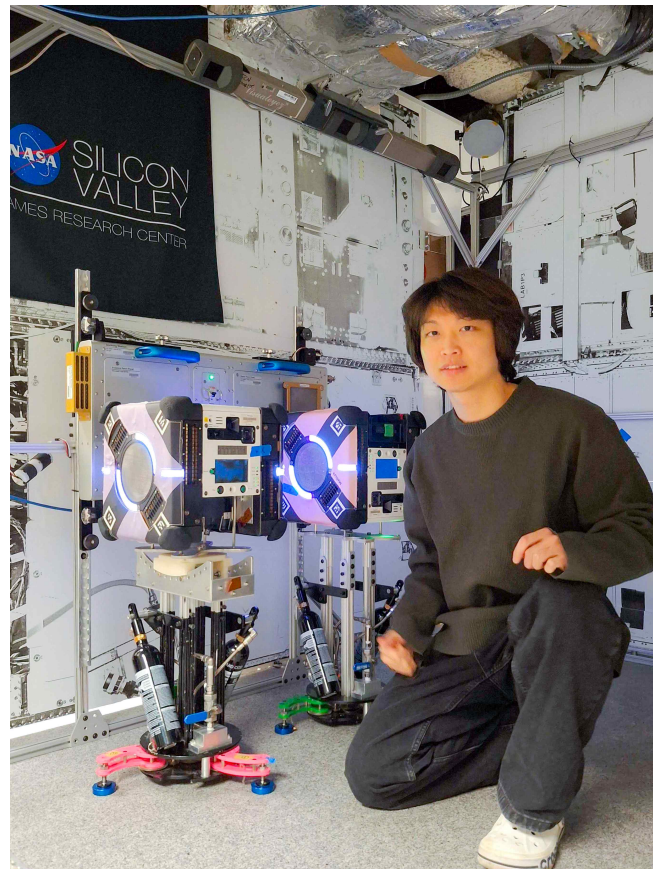
* Absolute Rotation Error(ARE, 절대 회전 오차): 예측된 회전과 실제 회전 간의 차이를 각도로 정량화한 지표로, 주로 카메라 자세 추정, SLAM, 3D 재구성 등의 성능 평가에 활용된다. 실제 회전 행렬과 예측 회전 행렬의 곱으로 얻은 오차 행렬에서 회전 각도를 추출해 계산하며, 0°에 가까울수록 두 회전이 잘 일치함을 의미한다. 따라서 ARE는 위치(translation)와 무관하게 회전 정확도만을 평가할 수 있는 핵심 지표로 쓰인다.



▲ ISS 이미지(왼쪽 위)에서 감지된 모든 선들과, 그에 대응하는 3D CAD 디지털 트윈에서 렌더링된 이미지(오른쪽 위)는 매우 복잡하게 어지러운(cluttered) 장면을 보여준다. 혼잡한 환경으로 인해 생긴 신뢰할 수 없는 특징들은, ISS의 맨해튼 프레임에 정렬된 구조적 특징들과 구분되어(왼쪽 아래), 카메라의 방향을 드리프트 없이 정확하게 추정할 수 있게 해준다(오른쪽 아래).

김표진 교수는 “이번 연구는 우주정거장과 같은 **극한 환경에서도 로봇이 방향을 잃지 않고 스스로 움직일 수 있도록 만든 기술**”이라며, “앞으로 이러한 디지털 트윈 기반 기술이 공항, 병원, 창고 등 **복잡한 실내 공간에서도 자율 로봇의 정확한 길찾기를 가능하게 할 것으로 기대된다**”고 말했다.

GIST 기계로봇공학과 김표진 교수가 지도하고 함중일 박사과정생이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단(NRF) 우수신진연구사업과 GIST 해외 공동연구 장학 프로그램(IREF, International Research Experience Fellowship)의 지원을 받았으며, **NASA의 주요 연구센터 중 하나인 에임스 연구센터(Ames Research Center)와 공동으로 수행됐다.**



▲ GIST 기계로봇공학과 함중일 학생이 NASA Ames Research Center의 Granite Lab(국제우주정거장 환경을 지상에서 모사하여 우주 로봇을 시험하는 연구시설)에서 연구를 수행하고 있다.

연구 결과는 우주로봇 분야의 대표 학술행사 ‘IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers·국제 전기전자공학자협회) 국제 우주임무 정보기술 및 우주컴퓨팅 학술대회(SMC-IT/SCC 2025)’와 연계해 미국 로스앤젤레스 ‘캘리포니아 사이언스 센터’에서 열린 ‘제2회 우주 로봇 워크숍(2nd Space Robotics Workshop)’에서 지난 7월 29일(화) 발표됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 게재 학술대회: The 2nd Space Robotics Workshop at IEEE SMC-IT/SCC 2025
- 논문명 : Drift-Free Visual Compass Leveraging Digital Twins for Cluttered Environments
- 저자 정보 : 함중일(제1저자, 기계로봇공학과), 김표진(교신저자, 기계로봇공학과), Ryan Soussan(2저자, NASA Ames Research Center), Brian Coltin(3저자, NASA Ames Research Center), Hoyeong Chun(4저자, 기계로봇공학과)