

기술논문

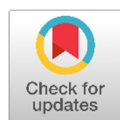
우주 로봇 위성의 개발 및 기술 동향

신한섭^{1,2}, 김해동³⁺

¹경상국립대학교 항공우주 및 소프트웨어공학부

²한국항공우주산업

³경상국립대학교 항공우주 및 소프트웨어공학부



Received: August 13, 2024

Revised: September 9, 2024

Accepted: September 23, 2024

†Corresponding author :

Hae-Dong Kim

Tel : +82-55-772-1641

E-mail : haedkim@gnu.ac.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Han-Seop Shin

<https://orcid.org/0009-0002-1235-6939>

Hae-Dong Kim

<https://orcid.org/0000-0001-9772-0562>

A Trends on a Development and Technology of Robotic Spacecraft

Han-Seop Shin^{1,2}, Hae-Dong Kim³⁺

¹Department of Aerospace and Software Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

²Korea Aerospace Industries, Sacheon 52529, Korea

³Department of Aerospace and Software Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

요약

뉴스페이스(New Space) 시대에 이르러 궤도상 서비싱(OOS, on orbit servicing) 임무를 수행하기 위한 인공위성들이 개발되고 있으며, 우주 로봇 위성, 우주 로봇팔, 우주 로봇 로버를 개발하여 서비스를 제공하려는 업체들이 생겨나고 있다. 궤도상 서비싱을 위한 다양한 임무는 고장수리, 재급유, 견인, 구성품 교체, 우주 상 건설 등의 여러 임무가 있으며, 이를 수행하기 위해 로봇팔 탑재체가 탑재된 로봇 위성 및 우주 로버 등이 개발되어야 한다. 궤도상 서비싱 임무를 수행하는 우주 로봇 위성의 개발은 해외에서는 다양한 업체 및 기관을 통해서 이루어지고 있으나, 국내에서는 그리 많지 않다. 본 논문에서는 우주 로봇 위성을 개발하는 해외 업체에 대해서 소개 및 정리하였으며, 우주 로봇 위성을 개발하기 위해 해외 업체에서 개발 및 적용한 기술에 대해서 기술하였다.

Abstract

In the era of New Space, satellites for performing on-orbit serving (OOS) missions are being developed, and companies are emerging to provide services by developing space robot satellites, space robot arms, and space robot rovers. Various missions for servicing in orbit include failure repair, refueling, towing, component replacement, and space construction, and to perform this, robot satellites and space rovers equipped with robot arm payloads must be developed. The development of space robot satellites that perform on-orbit serving missions is carried out by various companies and institutions overseas, but there are not many in Korea. In this paper, foreign companies that develop space robot satellites were introduced and organized, and technologies developed and applied by foreign companies to develop space robot satellites were described.

핵심어 : 궤도상 서비싱(OOS) 인공위성, 로봇 위성, 로봇 팔

Keywords : on-orbit servicing (OOS) spacecraft, robotic spacecraft, robotic arm

1. 서론

기존 위성은 주로 지구 관측, 기상 관측, 통신, 정찰, 심우주 관측 등의 임무를 수행했으며, 이러한 임무는 움직이지 않고 고정된 탑재체로 수행될 수 있다. 반면, 우주 로봇팔이 달린 우주 로봇 위성과 바퀴가 달린 우주 로버 등은 임무를 수행하기 위해 지속적으로 동작해야 한다는 특징이 있다. 또한, 위성의 구조체 내부에 존재하는 것이 아니라 극한의 우주 환경에 직접적으로 노출되어 있다는 점에서 개발 상의 여러 어려움이 따른다.

본 논문은 뉴스페이스 시대에 주로 개발되고 있는 우주 로봇팔과 이를 탑재한 로봇 위성 및 우주 로버에 대한 해외 업체들의 기술 개발 동향을 기술하였다.

2장에서는 우주 로봇팔, 우주 로버 및 우주 로봇을 개발하는 해외 업체 및 기관들에 대한 소개 및 개발 사항을 기술하였으며, 3장에서는 2장에서 소개하였던 업체들이 우주 로봇팔, 우주 로버 및 우주 로봇을 개발할 때 특히 중요하게 적용한 기술이 무엇인지 기술하였다.

본 논문은 해외에서 개발되고 있는 우주 로봇 위성 및 우주 로버 등의 개발 사례를 소개하여 우주 로봇 위성을 개발하려는 국내 업체들을 위한 개발 방향을 제시해 보고자 한다.

2. 우주 로봇 위성 해외 업체 개발 동향

2.1 GITAI[1]

2.1.1 업체 소개

GITAI는 일본의 우주 개발 로봇 스타트업 기업으로, 다양한 우주 개발을 위한 다목적 로봇 팔 및 우주 로버를 개발하는 일본의 스타트업 기업이다.

2.1.2 개발 제품 및 서비스

GITAI에서 개발한 제품은 아래와 같다.

- Inchworm Robot

: 인치웜 로봇(Inchworm Robot)은 표면을 "걸어다니는" 고유의 이동 방식을 사용하여 우주 정거장 및 위성에서 다양한 작업을 수행할 수 있으며, hand 부분이 교체 가능하여 다양한 도구가 사용될 수 있음(Fig. 1).

: 길이 2 m, DOF 7 + 2, 양쪽 끝 그래플 엔드 이펙터(grapple end effector), 제어(자율/원격 조종).

- Lunar Rover

: GITAI Lunar Rover는 달 탐사 및 인프라 개발을 위해 설계된 첨단 로봇 시스템임. 달 표면에서 다양한 작업을 수행할 수 있도록 설계되었으며, 인간의 개입 없이도 자율적으로 작동할 수 있음(Fig. 2).

- S2 Robotic Arm System

: GITAI의 S2 로봇팔 시스템은 국제 우주 정거장(International Space Station, ISS) 외부에서 자율적으로 작동하며, 조립, 유지보수, 제조 작업을 수행할 수 있음(Fig. 3).



Fig. 1. Inchworm Robot.

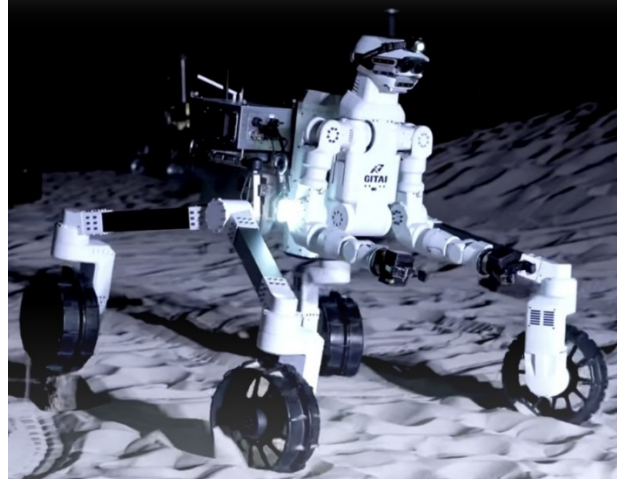


Fig. 2. GITAI Lunar Rover.



Fig. 3. S2 Robotic Arm System.

GITAI에서 수행하는 서비스는 아래와 같다.

- Space Station Support

: GITAI는 검증된 로봇팔 시스템을 이용하여 국제우주정거장(ISS) 및 저궤도(LEO)의 상업용 우주정거장에 IVR(intervehicular robots) 및 EVR(extravehicular robots) 서비스를 제공함.

: "그래플 엔드 이펙터"가 있는 GITAI의 자율 로봇 팔은 태양 전지판 조립, 반복적인 기어링, 이동 페이로드 및 스테이션 모듈, 검사 및 수리, EVA(human extravehicular activities) 지원 및 우주선 접안 지원과 같은 필수 응용 분야에 대한 민첩성을 최적화할 수 있도록 사용될 수 있음.

- ISAM Service

: ISAM(in-space servicing, assembly, and manufacturing) 서비스.

: 해당 서비스를 통해 재급유를 통한 수명 연장, 검사, 조립, 제조, 우주 쓰레기 제거 부품 교체, 우주 상 건설 등 다양한 서비스를 제공할 수 있음.

- Lunar Exploration

: 달 탐사 로버 및 탑재 로봇팔을 활용하여 달 기지 건설을 위한 인프라 구축, 로봇 노동 솔루션 제공, 달 탐사 및 채굴, 검사/유지보수/조립 등 다양한 작업 수행 가능함.

2.2 Maxar Technologies[2]

2.2.1 업체 소개

Maxar Technologies는 미국 콜로라도에 본사를 둔 항공우주 및 방위 산업 기업으로, 위성, 지리 공간 정보 및 로봇 공학 기술을 개발하는 선도적인 회사이다. Maxar는 우주 탐사, 궤도 내 서비스 및 우주 탐사를 위한 다양한 로봇팔을 개발하고 있으며, NASA를 비롯한 여러 정부 및 상업 기관과 협력하여 위성 연료 보급, 조립 및 수리 작업을 위한 로봇 시스템 개발 등 다양한 우주 임무를 지원하고 있다.

현재는 SUMO라는 인공위성에 탑재된 FRIEND 로봇팔을 제작한 SSL(Space System Loral)이라는 회사가 본 회사에 합병되었다.

2.2.2 개발 제품 및 서비스

Maxar Technologies에서 수행하는 서비스는 아래와 같다.

- Mars rovers 로봇팔

: 총 여섯 개의 화성 로버 및 착륙선에 로봇팔을 공급하였으며, 이 로봇팔은 화성 표면에서의 탐사, 시료 채취, 분석 작업을 수행함(Fig. 4).

: Spirit, Opportunity, Curiosity, Phoenix, Insight, Perseverance 로버 등 화성 탐사 임무에서 사용된 로봇팔을 개발함.

: Maxar는 NASA가 주관하는 OSAM-1(On-Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing) 임무 프로젝트의 위성 플랫폼 버스(Bus)와 로봇팔을 제공함(Fig. 5).

: Maxar는 SPIDER(Space Infrastructure Dexterous Robot) 로봇팔을 개발하여 우주에서 대형 구조물을 조립하는 기술을 개발 중에 있음(Fig. 6).

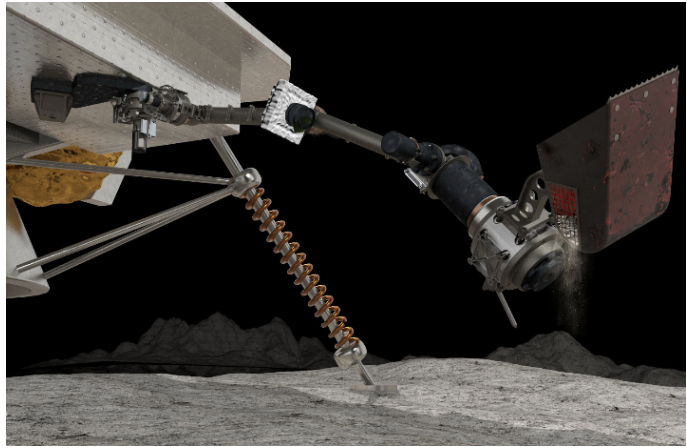


Fig. 4. Mars rovers Robotic Arm.

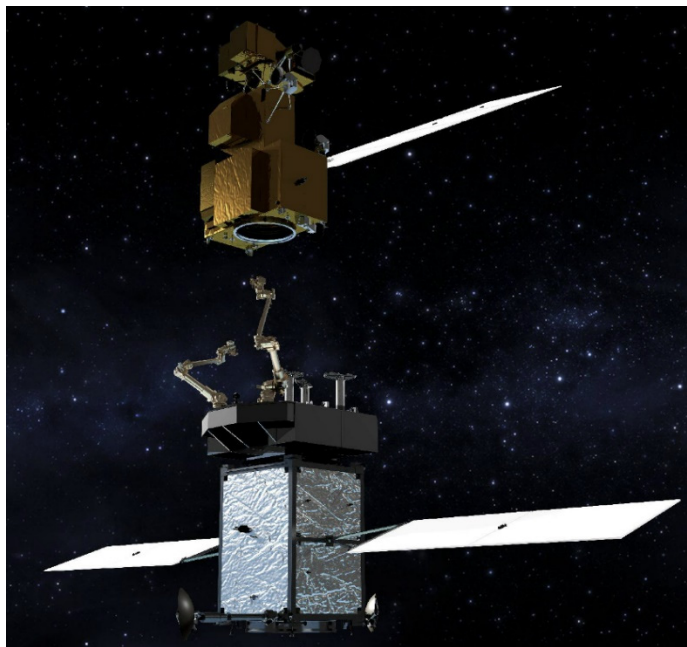


Fig. 5. OSAM-1 (Restore-L) mission concept.

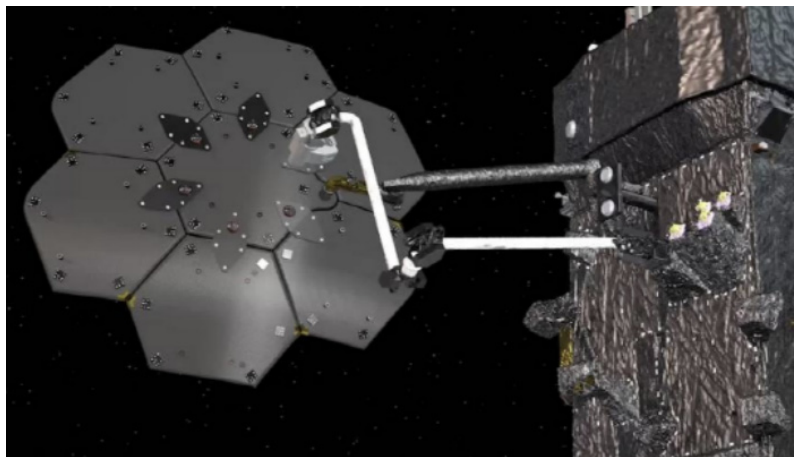


Fig. 6. SPIDER Robotic Arm.

2.3 Motiv Space Systems[3]

2.3.1 업체 소개

Motiv Space Systems는 2014년에 설립된 미국 캘리포니아주 패서디나에 본사를 둔 우주 로봇 공학 및 모션 제어 시스템 개발 회사이다. NASA와 JPL의 주요 파트너로, 화성 탐사 로버를 위한 로봇팔을 설계 및 제작했으며, 이 로봇팔은 화성 표면에서 샘플을 채취하고 분석하는 작업을 수행하였다.

2.3.2 개발 제품 및 서비스

Motiv Space Systems에서 개발한 제품과 수행하는 서비스는 아래와 같다.

- xLink Robotic Arm

: 모듈형, 확장형 로봇팔 시스템으로, 다양한 우주 임무에 유연하게 적용할 수 있으며, NASA의 OSAM-2(Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing-2) 미션에서 3D 프린팅된 태양 전지판을 배치하는 작업을 수행함(Fig. 7).

- ModuLink

: 고도의 모듈화 및 확장성을 가진 우주용 로봇 시스템으로, 수리 및 교체, 급유, 우주 쓰레기 제거, 제조, 견인 등의 임무를 수행할 수 있음(Fig. 8).

- Mars 2020 Perseverance Rover 로봇 팔

: Motiv에 의해서 개발되었으며, NASA의 Mars 2020 Perseverance 로버에 사용된 주요 로봇 팔로, 화성 표면의 샘플 수집 및 분석 작업을 수행함. 2.1 m 길이의 5 자유도 로봇 팔로, 중요한 과학 도구들을 장착하고 있으며, 극한의 화성 환경에서도 작동할 수 있도록 설계되었음(Fig. 9).



Fig. 7. xLink Robotic Arm.

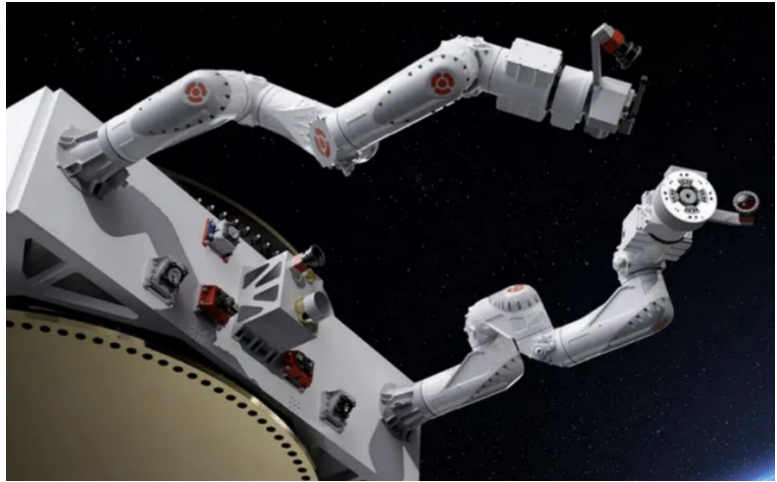


Fig. 8. ModuLink Robotic Arm.

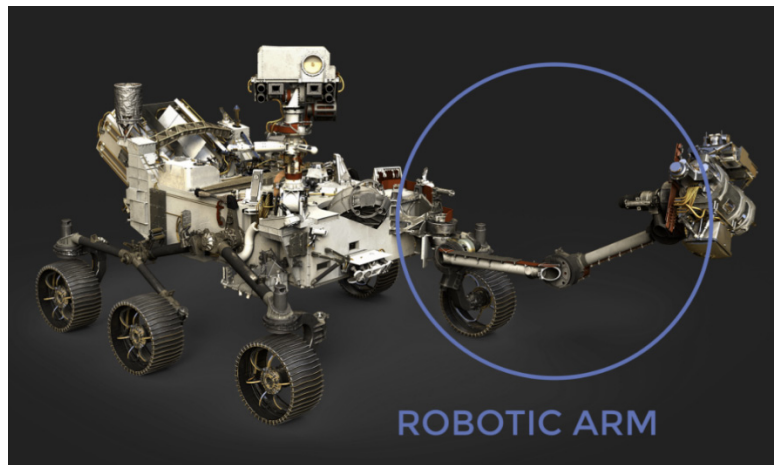


Fig. 9. Mars 2020 Perseverance Rover Robotic Arm.

Motiv는 OSAM-1 임무 프로젝트를 위해 고급 모션 제어 전자 장치를 제공하여 로봇팔의 움직임과 말단 장치의 작동을 제어하는 데 중요한 역할을 하였다.

2.4 Astroscale[4]

2.4.1 업체 소개

Astroscale는 2013년에 설립된 일본에 본사를 둔 회사로, 우주에서의 지속 가능한 발전을 위해 다양한 궤도 내 서비스 솔루션을 제공한다. 인공위성 수명 연장, 궤도 상황 인식, 인공위성의 운용 종료 및 우주 잔해 제거와 같은 서비스를 제공한다. 전 세계적으로 위성 운영자들에게 위험을 줄이고, 수익을 증대시키며, 임무 성공률을 높이기 위한 혁신적이고 확장 가능한 솔루션을 제공할 수 있다.

2.4.2 개발 제품 및 서비스

Astroscale에서 개발한 제품과 수행하는 서비스는 다음과 같다.

- End-of-Life Services(EOL)

: ELSA-d(End-of-Life Services by Astroscale-demonstration)는 세계 최초의 상업용 우주 잔해 제거 기술 시연 임무로, 자기 캡처 기술을 활용하여 저궤도 인공위성 서비스에 필요한 기술을 검증함.

: ELSA-M은 다중 클라이언트를 대상으로 한 제거 서비스로, 여러 위성을 한 번의 임무로 제거하여 서비스를 제공할 수 있음(Fig. 10).

- 능동 이물질 제거(active debris removal, ADR)

: ADRAS-J는 일본 JAXA와 협력하여 폐기된 일본 로켓 단계를 제거하기 위한 임무이며, 2025년에 시작될 예정임.

- 수명 연장(life extension, LEX)

: Astroscale은 미 국방부와 협력하여 궤도 내 연료 보급 위성을 개발하고 있으며, 위성의 수명을 연장하기 위한 연료 보급 서비스를 제공함.

- COSMIC(Cleaning Outer Space Mission through Innovative Capture)

: 진보된 우주 쓰레기 포집 기술을 활용하여 우주 쓰레기 제거를 통한 우주 환경 청소 서비스를 제공함(Fig. 11).



Fig. 10. ELSA-M mission concept.



Fig. 11. COSMIC mission concept.

2.5 MDA(MacDonald, Dettwiler and Associates)[5]

2.5.1 업체 소개

MDA는 캐나다에 본사를 두고 있는 우주 기술 회사로, 우주 로봇팔 및 관련 기술 개발에서 세계적인 선두 기업이다. Canadarm 로봇팔 시리즈를 개발하여 우주 개발 및 운용 서비스를 수행하였으며, 궤도상 서비스 및 군사용 위성 업그레이드 프로젝트를 수행하였다.

2.5.2 개발 제품 및 서비스

MDA에서 개발한 제품과 수행하는 서비스는 아래와 같다.

* 개발 제품 소개

- Canadarm1 → 공식 명칭은 Shuttle Remote Manipulator System(SRMS)이며, 캐나다가 NASA의 우주왕복선 프로그램을 위해 개발한 최초의 우주 로봇팔임.
- Canadarm2 → 국제우주정거장(ISS)에서 사용되는 17 m 길이의 로봇팔로, Canadarm1의 후속작이며, 2001년부터 현재까지 운용 중임.
- Canadarm3 → Canadarm3는 캐나다우주국(CSA)와 MDA가 공동으로 개발 중인 차세대 우주 로봇팔 시스템임. Canadarm3는 Canadarm1과 Canadarm2의 후속 모델로, 더욱 향상된 자율성과 다기능성을 갖추고 있음.
- Dextre → "Special Purpose Dexterous Manipulator"라는 이름으로도 알려져 있으며, 공식 명칭은 Special Purpose Dexterous Manipulator(SPDM)임.

* 서비스 소개

- 우주 로봇 및 인프라 서비스(Fig. 12)
 - : Canadarm 1 → NASA의 우주왕복선 프로그램을 위해 1981년부터 2011년까지 사용됨.
 - : Canadarm 2 → ISS의 유지보수, 장비 설치 및 우주선 도킹 지원 등의 다양한 작업을 수행함.
 - : Canadarm 3 → NASA의 루나 게이트웨이(Lunar Gateway) 프로젝트의 일환으로 설계되었으며, 달 궤도를 도는 우주 정거장에서 사용될 예정임.
 - : Dextre → Canadarm2에 부착되어 미세 조작 작업을 수행(Fig. 13).

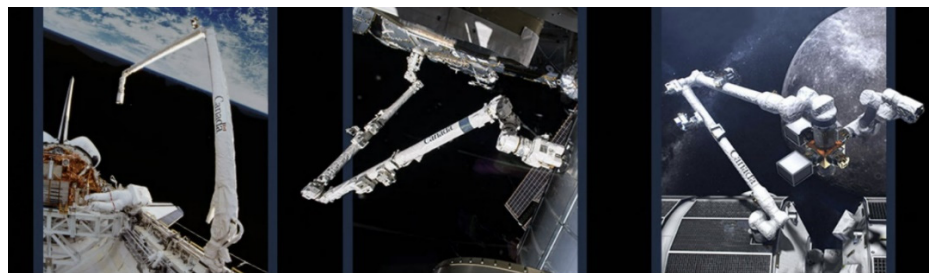


Fig. 12. Canadarm 1 (left), 2 (middle), 3 (right).



Fig. 13. Dextre Robotic Arm.

2.6 Northrop Grumman SpaceLogistics[6]

2.6.1 업체 소개

Northrop Grumman SpaceLogistics는 위성 수명 연장 및 우주 서비스 솔루션을 제공하는 Northrop Grumman의 자회사이다. 위성의 수명을 연장하고 우주에서 다양한 서비스를 수행하기 위해 최첨단 로봇 기술을 개발하고 있다.

2.6.2 개발 제품 및 서비스

Northrop Grumman SpaceLogistics에서 개발한 제품과 수행하는 서비스는 아래와 같다.

- Mission Extension Vehicle(MEV)

: MEV-1 → Intelsat 901 위성과의 도킹을 통해 위성의 수명을 연장하는 첫 번째 로봇 서비스 임무를 성공적으로 수행함. 고객 위성의 궤도 제어 및 자세 유지를 위해 설계됨 (Fig. 14).

: MEV-2 → IS-10-02 위성과의 도킹을 통해 동일한 기능을 제공하며, 5년 동안 위성과 연결된 상태로 운영될 예정임. 위성의 연장된 수명을 보장하며, 필요시 다른 위성으로 이동하여 재사용될 수 있음.

- Mission Robotic Vehicle(MRV)

: MRV는 기존의 MEV 시스템을 기반으로 개발되었으며, 더 복잡한 우주 서비스 작업을 수행할 수 있는 로봇팔을 통합함. 이 로봇팔은 위성의 점검, 수리, 재배치, 활성 잔해 제거 등을 포함한 다양한 작업을 수행할 수 있음(Fig. 15).

- Mission Extension Pods(MEPs)

: MEP는 소형 위성체에 부착되어 위성의 궤도 제어를 지원하는 저비용 연장 서비스임.
MRV는 이러한 팻을 상업 및 정부 고객의 위성체에 설치하여 6년의 추가 수명을 제공함
(Fig. 16).

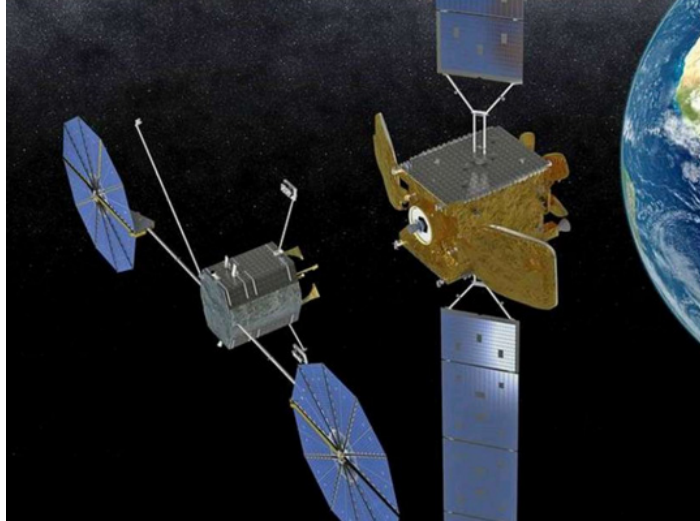


Fig. 14. Mission Extension Vehicle (MEV) mission concept.

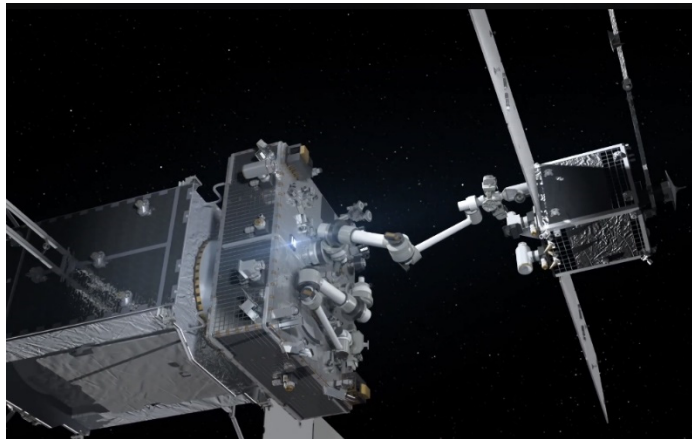


Fig. 15. Mission Robotic Vehicle (MRV) mission concept.

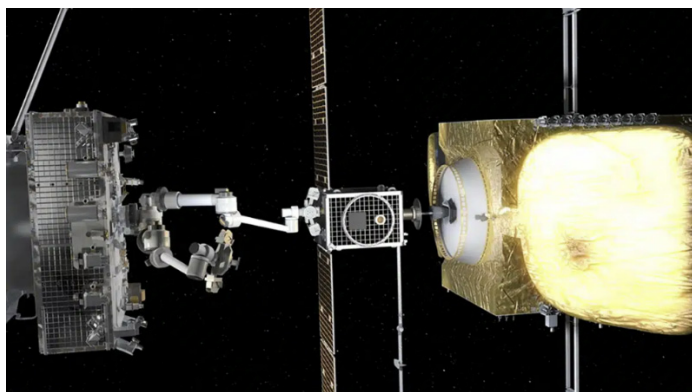


Fig. 16. Mission Extension Pods (MEPs) mission concept.

2.7 Altius Space Machines[7]

2.7.1 업체 소개

Altius Space Machines는 2010년에 설립된 미국 콜로라도주 브룸필드에 본사를 둔 우주 로봇 공학 및 기술 스타트업이며, 2019년에 Voyager Space에 인수되었다. Altius는 우주 물류와 궤도 내 서비스 솔루션을 제공하며, 특히 궤도 랑데부와 캡처 로봇 공학, 능동적 우주 잔해 제거, 우주 기기 메커니즘, 궤도 내 추진제 이전, 위성 서비스, 궤도 내 조립 및 제조에 중점을 두고 있다. Altius는 다양한 위성 서비스 기술을 개발하며, 특히 로봇팔과 결합된 그랩플 피쳐(DogTag™) 및 전자 영구 자석(electropermanent magnet, EPM) 기술로 유명하다.

2.7.2 개발 제품 및 서비스

Altius Space Machines에서 개발한 제품과 서비스는 아래와 같다.

- DogTag™

: DogTag™는 다양한 캡처 방법을 지원하는 범용 그랩플 고정 장치임(Fig. 17).

- Electropermanent Magnets(EPMs)

: 전기 영구 자석으로, 전기적 신호를 통해 자력 상태를 변환할 수 있는 자석임.

: 이 기술은 기존 영구 자석과 전자석의 장점을 결합한 것으로, 전원이 필요할 때만 전력을 사용하여 자석의 상태를 변경할 수 있음.

: 로봇팔의 그랩플 피쳐와 같은 부품에 적용되어 위성이나 다른 우주 기기를 안정적으로 포획하고 고정할 수 있음. 이 기술은 우주 잔해 제거, 위성 수리 및 연료 보급 작업에 유용함.

- Dual-mode EPM

: Altius는 현재 듀얼 모드 EPM을 개발하기 위해 노력하고 있음. Dual-mode EPM은 단거리 또는 장거리에 따라 다른 힘을 가하여 충분한 전자기적 그립력을 가할 수 있음.

- EPM based products

: Altius는 EPM 기술이 포함된 많은 제품을 개발했으며 궤도 서비스의 요구 사항을 충족하기 위해 새롭고 혁신적인 제품을 계속 발명하고 있음.

- MagTag™

: 전자 영구 자석(EPM) 기술을 사용하여 위성과 모듈을 견고하게 연결하는 시스템임(Fig. 18).

- Magnetic tool changer

: Altius의 마그네틱 툴 체인저는 솔리드 스테이트 전환 가능한 EPM 마그네틱 래치를 사용하며 로봇 엔드 이펙터 역할을 함(Fig. 19).

- Low-Inertia STEM Arm(LISA)

: LISA는 가볍고 유연한 로봇팔로, 국제우주정거장(ISS)의 Assistive Free-Flyers(AFFs)를 위한 로봇팔 시스템임. 이 로봇팔은 기존의 로봇팔 보다 낮은 질량과 관성을 가지며, 접근이 어려운 위치에 도달할 수 있는 능력을 제공함. 우주 환경에서 정밀한 조작 작업을 수행할 수 있음.

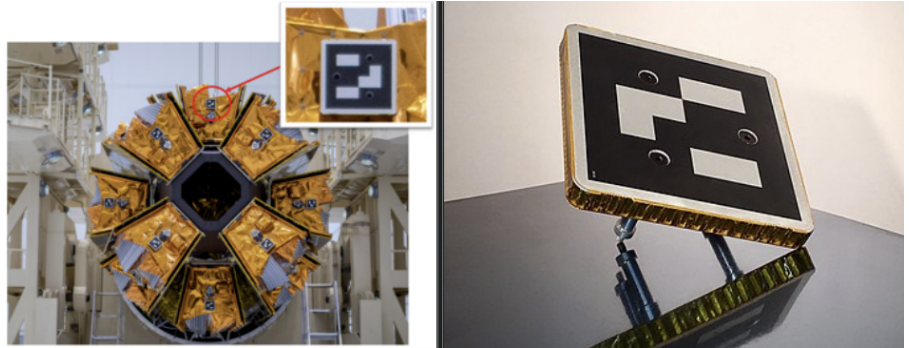


Fig. 17. DogTag™.

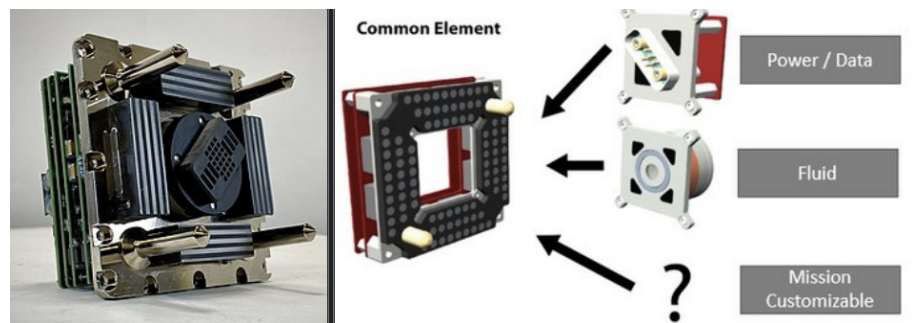


Fig. 18. MagTag™.

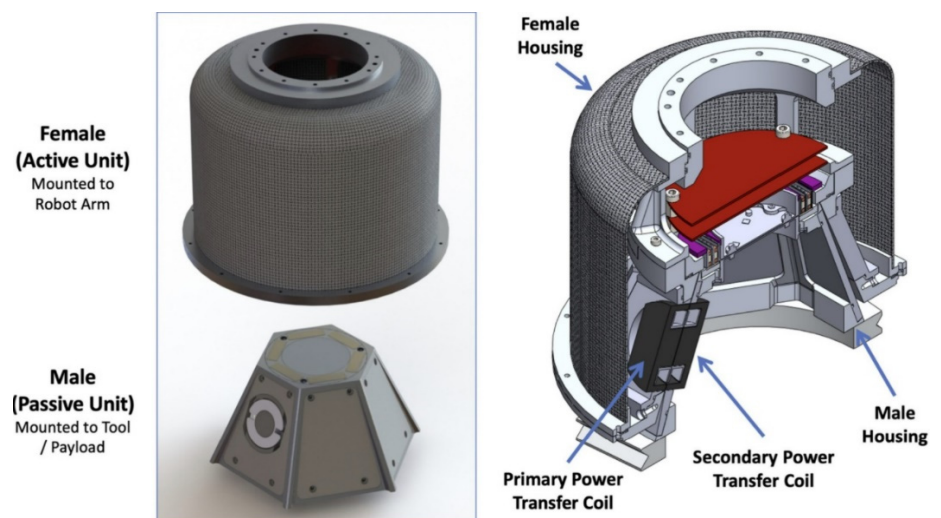


Fig. 19. Magnetic tool changer.

2.8 DARPA[8]

2.8.1 업체 소개

미국방위고등연구계획(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)는 미국 국방부 산하 연구기관이다.

2.8.2 개발 제품 및 서비스

DARPA에서 개발한 제품과 및 서비스는 아래와 같다.

- FRENED 로봇팔 시스템

: RSGS(Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites) 임무 수행을 위해 FRENED 로봇팔 시스템을 개발하였으며, FRENED 로봇팔은 OSAM-1/Restore-L 및 RSGS에서 사용될 계획을 가지고 있음(Fig. 20).

: FRENED 로봇팔은 OSAM-1/Restore-L 및 RSGS에서 사용될 계획을 가지고 있음.

- 아스트로(ASTRO) 위성, 넥스트셋(NEXTSat)

: Orbital Express 프로젝트를 위해 로봇팔을 탑재한 두대의 위성을 개발함(Fig. 21).

- Phoenix 프로젝트

: 궤도상에서 위성을 수리, 연료 보급, 업그레이드하는 기술을 개발하고 실증하는 것을 목표로 하고 있음.

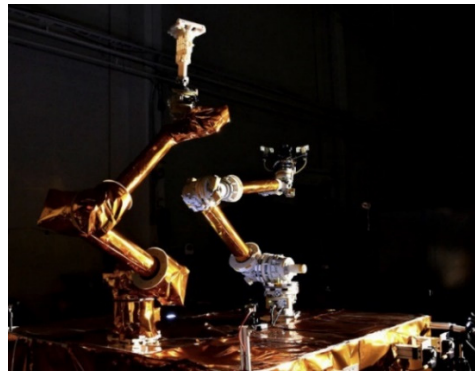


Fig. 20. FRENED Robotic Arm.

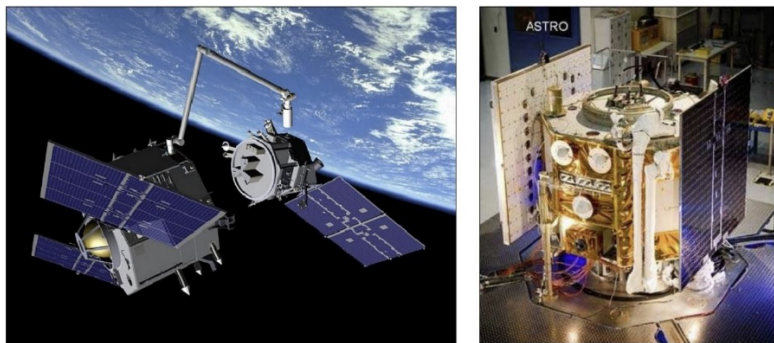


Fig. 21. Capturing NEXTSat using ASTRO Robotic Arm (left), ASTRO (right).

2.9 요약(Table 1)

Table 1. 우주 로봇 위성 해외 업체 개발 동향 요약

업체명	국적	업체소개	개발 제품	개발 서비스
GITAI	일본	스타트업, 다목적 로봇팔 및 우주 로버 개발	Inchworn Robot, Lunar Rover, S2 Robotic Arm System	Space Station Support, ISAM Service, Lunar Exploration 수행
Maxar Technologies	미국	항공우주 방위산업기업, 위성 및 로봇 개발	화성 탐사 로버 로봇팔(Spirit, Opportunity, Curiosity, Phoenix, Insight, Perseverance), OSAM-1 위성 플랫폼 및 로봇팔, SPIDER 로봇팔	화성 탐사 로버 임무, OSAM-1 위성 임무 등 수행
Motiv Space Systems	미국	우주 로봇 및 제어 시스템 개발 업체	xLink Robotic Arm, Modulink, Perserance 로버 로봇팔 제어 시스템	화성 탐사 로버 임무, OSAM-2 위성 임무 등 수행
Astroscale	일본	궤도상 서비스 제공 기업	ELSA-d, ELSA-M, ADRAS-J, COSMIC	ELSA-d, ELSA- M, ADRAS-J, COSMIC 임무 수행
MDA	캐나다	우주 로봇팔 개발 업체	Canadarm 1, 2, 3, Dextre	ISS 국제우주정거장 임무 수행 지원
Northrop Grumman SpaceLogistics	미국	위성 수명 연장 및 우주 서비스 솔루션 제공 업체	Mission Extension Vehicle(MEV), Mission Robotic Vehicle(MRV), Mission Extension Pods(MEPs)	MEV-1,2 임무 수행 (Intelsat 및 IS- 10-02 위성 도킹 및 서비스 제공)
Altius Space Machines	미국	우주 로봇 공학 및 기술 스타트업	DogTag™, Electropermanent Magnets(EPMs), Dual- Mode EPM, EPM Based Products, MagTag™, Magnetic Tool Changer, Low-Inertia STEM Arm(LISA)	ISS 임무 수행 지원
DARPA	미국	미국 국방부 산하 연구기관	FREND 로봇팔, ASTRP 위성/NEXTSat 위성, Phoenix 프로젝트	OSAM-1, Restore-L, RSGS 임무 수행

SPIDER, Space Infrastructure Dexterous Robot; ELSA, End-of-Life Services by Astroscale; COSMIC, Cleaning Outer Space Mission through Innovative Capture; ISS, International Space Station; OSAM-1, On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing; OSAM-2, Orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing-2.

3. 우주 로봇 위성 적용 기술

3.1 GITAI[1]

3.1.1 인치웜 로봇팔 시스템 기술

GITAI에서 양쪽 끝에 '그래플 엔드 이펙터(Grapple end-effectors)'를 장착한 인치웜(Inchworm) 로봇팔 'IN1(Inchworm One)'을 개발하였다. 이 로봇팔은 자벨러처럼 양끝을 번갈아 이동하여 우주 공간에서 작업을 수행할 수 있으며, 인공위성이나 로버 등의 표면을 유연하게 이동하며 다양한 작업을 수행할 수 있다. 인치웜 로봇팔의 두드러진 특징 중 하나는 팔의 양쪽 끝에 위치한 그래플 엔드 이펙터(Grapple end-effectors)이며 이를 통해 우주선 도킹, 탑재체 조작, 검사 및 수리와 같은 다양한 궤도상 서비스 임무를 수행할 수 있다. 인치웜 로봇팔은 JAXA의 열진공 챔버에서 로봇팔 기능/성능 시험을 성공적으로 검증한 바 있으며, 기술 준비 수준(technology readiness level, TRL) 6을 달성하였다. 또한 국제 우주 정거장(ISS) 외부에서의 작업을 통해 TRL 7을 목표로 하고 있다(Fig. 22).

3.1.2 인치웜 로봇팔 자율 작업 수행(autonomous operations) 기술

GITAI의 인치웜 로봇 시스템은 높은 수준의 자율성을 가지고 있다. 인간의 개입 없이도 다양한 작업을 수행할 수 있으며, 제한된 대역폭 환경에서도 원격 조작 없이 작업을 수행할 수 있다. 인치웜 로봇 시스템은 고급 센서로 자율 제어되어 복잡한 작업을 수행할 수 있으며, '휴먼 인 더 루프(Human-in-the-loop)' 시스템을 활용하여 운영자가 직접 임무에 관여할 수 있다. 해당 기술은 GITAI의 소프트웨어를 기반으로 하고 있다(Fig. 23).

3.1.3 인치웜 로봇팔 모듈화(modularity) 기술

GITAI의 로봇팔은 모듈식 설계를 통해 다양한 도구와 작업에 쉽게 적응할 수 있다. 인치웜 로봇(Inchworm Robot)은 양 끝에 "그랩플 엔드 이펙터(grapple end-effectors)"를 장착하여

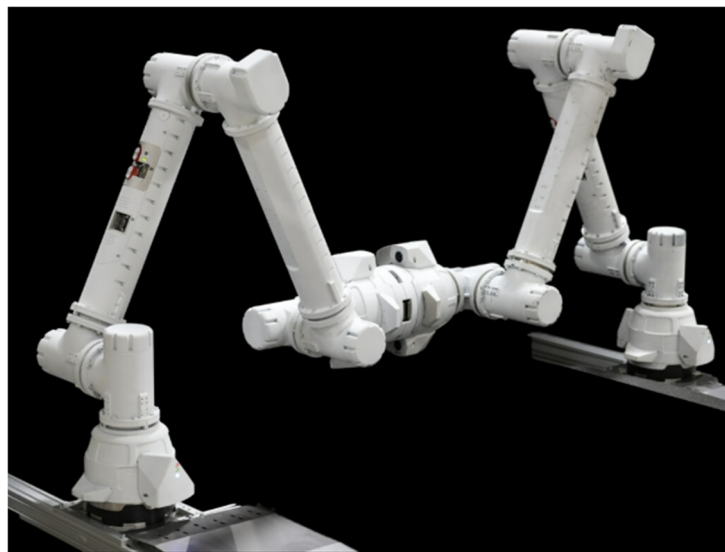


Fig. 22. GITAI Inchworm Robor Arm IN1.

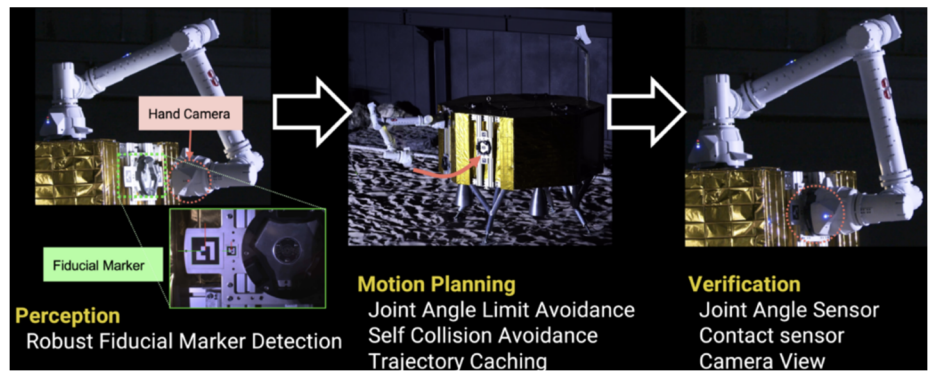


Fig. 23. GITAI Inchworm Robor Arm IN autonomous operations technologies.

다양한 도구와 연결할 수 있으며, 필요시 두 개의 인치웜 로봇팔을 함께 연결하여 다목적 작업을 수행할 수 있다.

3.1.4 환경 적응 능력(environmental adaptability) 검증 기술

GITAI의 로봇 시스템은 극한의 우주 환경에 적응할 수 있도록 설계되었다. 진동, 열 진공, 방사선 테스트를 포함한 다양한 환경 테스트를 통해 검증되었으며, JAXA의 열진공챔버를 통해 TRL 6에 해당하는 로봇팔 기능/성능 시험 검증을 수행하였다.

3.1.5 협력 로봇(collaborative robotics) 기술

GITAI는 다중 로봇 협력 작업에도 중점을 두고 있다. 모하비 사막에서 여러 대의 로봇이 협력하여 통신 안테나 설치, 타이어 교체, 구멍 뚫기, 금속 패널 용접, 태양광 패널 조립 등의 작업을 수행하는 시연을 성공적으로 마쳤다.

3.1.6 인치웜 로봇팔의 key technologies

GITAI의 인치웜 로봇팔에 적용되는 다른 기술들은 Fig 24와 같이 Actuator, Tool Changer, Redundant OBC, Motor Controller 등이 있으며, 인치웜 로봇팔이 다양하고 복잡한 임무를 수행할 수 있게 한다(Fig. 24).



Fig. 24. GITAI Robotic Arm's key technologies.

3.2 Maxar Technologies[2]

3.2.1 자율 제어 시스템(autonomous control systems) 기술

Maxar의 Spider 로봇팔 시스템은 자율 제어 기능을 갖추고 있어, 우주에서 정확하고 효율적으로 작업을 수행할 수 있다.

3.2.2 고해상도 센서 및 비전 시스템(high-resolution sensors and vision systems) 기술

Maxar의 Spider 로봇팔 고해상도 센서 및 비전 시스템 기술은 목표를 정확하게 식별하고 작업을 수행할 수 있도록 지원한다.

3.2.3 모듈형 도구 교환 시스템(modular tool exchange systems) 기술

Maxar의 Spider 로봇팔 모듈형 도구 교환 시스템 기술은 다양한 도구를 쉽게 교체하여 여러 가지 작업을 수행할 수 있게 한다(Fig. 25).

3.3 Motiv Space Systems[3]

3.3.1 xLink 로봇팔 조립 기술

Motiv의 xLink 로봇팔은 길이 및 자유도에 대한 확장이 가능하며, 사용자에게 요구도에 맞게 설계될 수 있다.

3.3.2 ModuLink 모듈형 도구 교환 시스템(modular tool exchange systems) 기술

Motiv의 ModuLink 로봇팔의 모듈형 도구 교환 시스템 기술은 다양한 도구를 쉽게 교체하여 여러 가지 작업을 수행할 수 있게 한다.

3.3.3 광학 카메라 센서 기술

Motiv의 ModuLink 로봇팔은 광학 카메라, LIDAR 및 적외선 카메라 옵션을 가지고 있어 고급 센서 기능을 탑재하고 있다(Fig. 26).

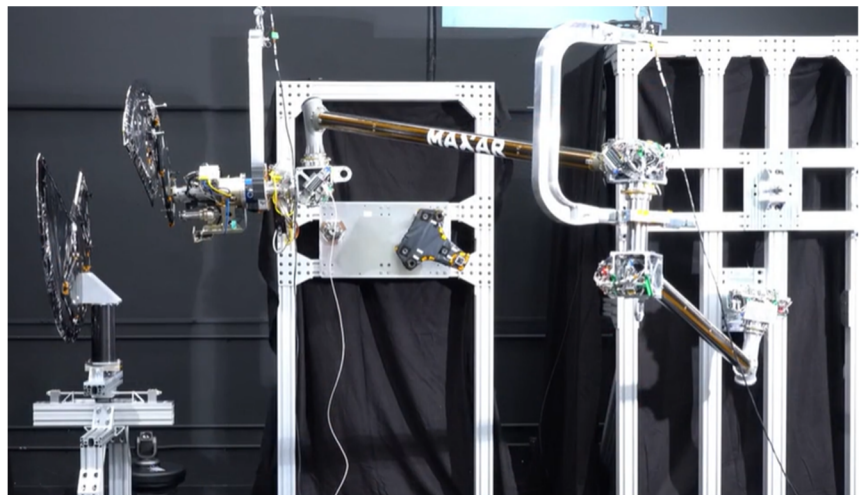


Fig. 25. MAXAR Spider Robotic Arm's operation test simulation.



Fig. 26. Motive Space System's Robotic arms (left: xlink, right: modulink).

3.4 Astroscale[4]

3.4.1 마그네틱 캡처 기술

Astroscale 업체에서는 ELSA-d(End-of-Life Services by Astroscale-demonstration) 임무에서 쓰일 마그네틱 캡처 기술을 개발하였다. 자기력을 이용하여 잔해 제거 및 궤도 서비스를 수행할 수 있는 기술이다(Fig. 27).

3.4.2 패드 기반 접촉 시스템

Astroscale 업체에서는 다양한 표면에 부드럽게 접촉할 수 있도록 하는 기술은 패드 기반 접촉 시스템을 개발하였다.

3.5 Altius Space Machines[7]

3.5.1 DogTags™ 기술

다양한 포획 방법을 지원하는 범용 그랩플 피쳐로, 위성의 수명 연장 및 궤도 내 서비스에

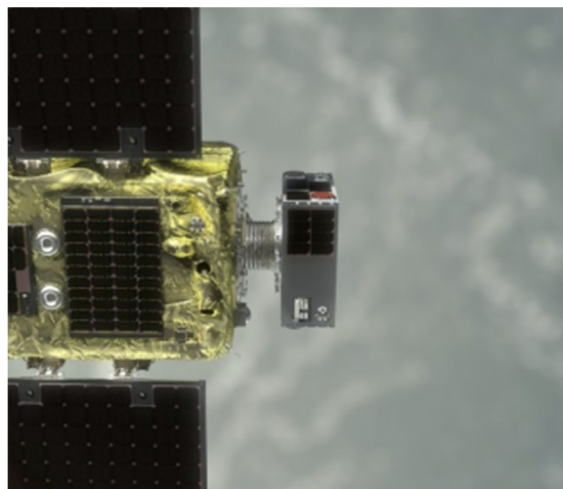


Fig. 27. Astroscale magnetic capture tech.

사용된다. 이 시스템은 기계적 포획, 자석 포획, 계코 접착, 전기 정전기 접착, 하푼 포획 등을 지원한다. 적용 사례로 OneWeb의 위성에 탑재되어 궤도 내 서비스 작업을 지원하고 있다.

3.5.2 EPM(electropermanent magnets) 기술

Altius Space Machines의 특허 기술로, 기존 기계 또는 자기 인터페이스에 비해 많은 이점을 제공한다. EPM은 솔리드 스테이트 전환 가능한 자석으로, 움직이는 부품이 없으며 무제한의 폼 팩터에 넣을 수 있다.

3.5.3 Dual-mode EPM 기술

Altius는 현재 듀얼 모드 EPM을 개발하는 중이다. EPM에는 "장거리 모드"(LRM)와 "단거리 모드"(SRM)가 있다. LRM은 5 cm 거리에서 의미 있는 힘을 가하고, 10-20 cm에서 약간의 힘을 가하며, 접촉 시 "튀김"을 방지하기에 충분한 그립력을 가할 수 있다. SRM은 그립 압력 200 kPa까지 도달한다.

3.5.4 MagTags™ 기술

전자 영구 자석(EPM) 기술을 사용하여 위성과 모듈을 견고하게 연결하는 시스템이다. 이 시스템은 전력 및 데이터 전송을 지원하며, 강력한 자석 연결을 제공한다. 우주에서 다양한 모듈을 연결하여 수리, 유체 전송, 모듈 업그레이드 등을 지원한다.

3.5.5 Magnetic tool changer 기술

Altius의 마그네틱 툴 체인저는 솔리드 스테이트 전환 가능한 EPM 마그네틱 래치를 사용하여 로봇 엔드 이펙터 역할을 한다.

3.6 요약(Table 2)

Table 2. 우주 로봇 위성 적용 기술 요약

업체명	적용 기술
GITAI	인치웜 로봇팔 시스템 기술, 인치웜 로봇팔 자율 작업 수행(autonomous operations) 기술, 인치웜 로봇팔 모듈화(modularity) 기술, 환경 적응 능력(environmental adaptability) 검증 기술, 협력 로봇(collaborative robotics) 기술, 인치웜 로봇팔의 key technologies
	자율 제어 시스템(autonomous control systems) 기술, 고해상도 센서 및 비전 시스템(high-resolution sensors and vision systems) 기술, 모듈형 도구 교환 시스템(modular tool exchange systems) 기술
Maxar Technologies	
Motiv Space Systems	xLink 로봇팔 조립 기술, moduLink 모듈형 도구 교환 시스템(modular tool exchange systems) 기술, 광학 카메라 센서 기술
Astroscale	마그네틱 캡처 기술, 패드 기반 접촉 시스템
Altius Space Machines	DogTags™ 기술, EPM(electropermanent magnets) 기술, Dual-Mode EPM 기술, MagTags™ 기술, magnetic tool changer 기술

4. 결론

본 논문에서는 다양한 궤도상 서비스 임무를 수행하기 위한 우주 로봇 위성과 관련된 해외의 다양한 업체들을 소개하였으며, 업체별 우주 로봇 위성을 위한 개발 및 기술들에 대해 기술하였다. 해외에서는 궤도상 서비스 임무를 수행하기 위한 로봇 위성이 민간 기업에서도 다양하게 개발되고 있으며, 이에 따라 능동적인 동작이 요구되는 임무가 점차 증가할 것으로 예측되며, 향후 국내에서도 해외에서 이루어지고 있는 민간기업의 우주 로봇틱스 개발 사례와 마찬가지로 궤도상 서비스 임무를 수행하는 우주 로봇 위성 개발이 이루어져야 된다고 판단된다. 우주 로봇 위성은 기존 위성과 달리 로봇 탑재체가 심우주 공간에 노출된채로 지속적으로 움직여야 하는 탑재체이다. 기존 위성의 탑재체는 초기 운영 시 전개 등 동작 후 움직이지 않으나, 로봇 탑재체는 지속적인 동작이 필요하다. 따라서 극한의 우주 환경으로 인해 열구조적인 변형이 생겨 임무에 영향성을 줄 수도 있으며, 전자기적인 환경도 전자기 구성품의 기능에 영향을 줄 수 있어 지속적인 움직임에 영향을 주는 등 개발 상에 어려움이 생길 수 있다. 또한 로봇 탑재체는 고도의 기술이 요구되는 궤도상 서비스 임무를 수행 하게 되므로 기술적인 부분에서도 국내외적으로 연구개발 되어야 할 것으로 생각된다.

본 논문의 내용은 앞으로 뉴스페이스 시대를 위한 로봇 위성 개발에 대한 시야를 넓혀주고 우주 로봇 위성을 개발하는 국내의 새로운 업체들에게 개발 방향을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 궤도상 서비스 시장은 국내에서 고려해야 할 시장이라고 생각이 되기에 우주 로봇팔 개발을 시작으로 궤도상 서비스를 수행하는 로봇 위성 개발에 대해서 전략적 접근이 필요할 것으로 판단된다. 향후 앞으로도 계속 개발되고 있는 재공유, 구성품 교체 등의 임무를 수행하는 우주 로봇 시스템을 개발하고 있는 다양한 업체 및 기술들의 개발 동향에 대해서도 추가 조사 및 기술할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 경상국립대학교 2022년 과학기술통신부의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2074536)의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

References

1. GITAI, Robotics Startup for Space Development (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22 , available from: <https://gitai.tech/>
2. MAXAR, Explore,Connect,Protect (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://www.maxar.com/>
3. Motiv Space Systems, Building the Future of Space (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://motivss.com/>
4. Astroscale, Astroscale (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://astroscale.com/>
5. MDA Space, MDA Space (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://mda.space/>

6. Northrop Grumman, Northrop Grumman (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://www.northropgrumman.com/>
7. Voyager Space, In-Space Servicing & Assembly (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://voyagerspace.com/innovate/in-space-servicing-assembly/>
8. DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency (2024) [Internet], viewed 2024 Nov 22, available from: <https://www.darpa.mil/>

Author Information

신 한 섭 h0611s@naver.com



과학기술연합대학원에서 2018년 석사학위를 취득하였다. 2018년부터 한국항공우주산업(주)에서 선임연구원으로 재직하고 있으며, 현재는 군정찰 위성, 정지궤도 기상위성 등의 열 제어 시스템 업무를 수행하고 있다. 경상국립대학교에서 박사과정 중에 있으며, 궤도상 서비싱, 우주 로보틱스 및 우주 로봇 위성의 열/구조 시스템 등의 연구를 수행하고 있다.

김 해 동 haedkim@gnu.ac.kr



과학기술연합대학원에서 2018년 석사학위를 취득하였다. 2018년부터 한국항공우주산업(주)에서 선임연구원으로 재직하고 있으며, 현재는 군정찰 위성, 정지궤도 기상위성 등의 열 제어 시스템 업무를 수행하고 있다. 경상국립대학교에서 박사과정 중에 있으며, 궤도상 서비싱, 우주 로보틱스 및 우주 로봇 위성의 열/구조 시스템 등의 연구를 수행하고 있다.