

Universidad de Salamanca | Grado en Ingeniería Informática

Robots Espaciales

Berrocal Macías, David

López Sánchez, Javier

Mateos Pedraza, Alejandro



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Abstract: In this work we want to make a brief introduction to space robotics, as the main exponent of the field of robotics in our days, its areas of work, main exponents, challenges and opportunities. A review that relies on history and evolution as a starting point to open the doors to the investigation of future journeys beyond the Earth's surface.

Keywords: Robotics, Space, Space Robotics, Rover, NASA, ISS.

Índice de Contenidos

I.	Estado del Arte	1
II.	Historia de la Robótica Espacial y evolución.....	2
1.	Hitos históricos: sistemas robóticos orbitales.....	2
2.	Hitos históricos: sistemas robóticos superficiales.....	3
III.	Desafíos de la Robótica Espacial. Problemas derivados de la exploración del espacio.....	3
IV.	Áreas tecnológicas involucradas.....	4
V.	Características de un Robot Espacial	4
VI.	Aplicaciones de los Robots Espaciales	6
1.	Tipos de Robots Espaciales.....	6
2.	Principales exponentes de la Robótica Espacial.....	6
VII.	Objetivos tecnológicos y retos. Misiones Espaciales futuras	11
1.	Metas tecnológicas y desafíos.....	11
2.	Beneficios, oportunidades y futuras misiones espaciales.....	12
VIII.	Referencias.....	1

I. Estado del Arte

En la comunidad espacial, cualquier nave espacial no tripulada puede ser llamada una nave espacial robótica. No obstante, en el espacio, los robots son considerados dispositivos con alto grado de especialización enviados al exterior con objeto facilitar tareas como la manipulación, el ensamblaje, o funciones de servicio en órbita como asistentes de astronautas, o para ampliar las áreas y habilidades de exploración en planetas remotos como sustitutos de los exploradores humanos.

Podríamos definir la robótica espacial como el desarrollo de máquinas que son capaces de sobrevivir a los rigores del entorno espacial, capaces de explorar, montar, construir, mantener y servir las necesidades humanas en el espacio, tanto si fueron diseñados para su tarea o no.

Los humanos podemos controlar este tipo de robots espaciales en local. Véase, por ejemplo, un brazo robótico para maniobrar cargas, controlado desde un joystick en la Estación Espacial Internacional (tal es el caso del robot Canadarm, que posteriormente se detallará); de forma remota, como los famosos Rovers de la exploración de Marte, controlados a distancia desde la Tierra; o de forma autónoma, cuando las distancias o las condiciones hacen imposible el control local o remoto. Es entonces cuando entra en juego el robot autónomo, o pre-programado, que en definitiva no deja de ser, actualmente, una forma de control remoto más sofisticada.

Los sistemas robotizados y autónomos (RAS - Robotic and Autonomous Systems) espaciales tienen una gran importancia en las posibilidades del ser humano para explorar y operar en el espacio, ofreciendo una forma adicional de apoyo a las habilidades del astronauta así como un mayor acceso que no sería posible conseguir únicamente con naves espaciales dadas sus limitaciones. Los sistemas autónomos son tan eficientes porque reducen considerablemente el riesgo y el coste de los viajes espaciales.

Los RAS espaciales cubren todo tipo de robots, tanto para la exploración de una superficie planetaria como aquellos que orbitan en torno a la Tierra con el fin de localizar asteroides, reparar satélites o simplemente como fuente de información para la investigación científica. Además, pueden preparar una determinada superficie y construir infraestructuras que permitan el aterrizaje de personas en ésta. En función de la aplicación para la que esté destinado el robot estará diseñado con una determinada funcionalidad. Existen, además, como ya se ha introducido, diferentes niveles de autonomía establecidos por la ECSS (European Cooperation for Space Standardization):

- E1: Operaciones remotas y tele-operaciones
- E2: Operaciones automáticas
- E3: Operaciones semi-autónomas
- E4: Operaciones completamente autónomas

A fin de tratar de imaginar las implicaciones que el campo de la robótica espacial tiene sobre la ciencia y la investigación, imaginemos una misión a Titán, una de las lunas de Saturno, que tiene lagos y ríos de metano líquido. El mero hecho de poner los pies allí impondría a la humanidad la inversión de un tiempo del que no dispone, con la tecnología actual. Imaginemos que llevásemos soportes vitales de oxígeno, comida, agua, ocio, ... Todo ello es algo que, por ahora, resulta inviable desde el punto de vista económico (actualmente cuesta diez mil dólares llevar un solo kilogramo a la baja órbita de la Tierra). Por tanto, mandar robots a cubrir estas necesidades primarias de exploración supone una clara ventaja y les convierte, además, en un planteamiento sumamente atractivo de cara a este tipo de misiones que de otra manera habríamos de llamar "suicidas", no solo por su capacidad de supervivencia en terreno hostil o si prefiere el lector, inexplorado, sino también por ser capaces de permanecer "dormidos", esperando órdenes, durante largos periodos de tiempo, preparados para realizar las mismas actividades con el mínimo riesgo para los humanos.

II. Historia de la Robótica Espacial y evolución

La necesidad del ser humano de explorar más allá de los límites de la Tierra está marcada por nuestra curiosidad innata. A lo largo de la historia, el nuevo mundo ha sido descubierto por aquellos exploradores suficientemente atrevidos que se embarcaron con el fin de descubrir nuevas tierras, riquezas o un mejor conocimiento de estos territorios hasta el momento prácticamente desconocidos. Estos viajes estuvieron llenos de avances tecnológicos como la brújula o las cartas de navegación.

Desde la década de los años 50 la humanidad ha establecido nuevas fronteras de exploración en el espacio. Entre los 50 y los 60 se desarrolla la carrera espacial entre la URSS y Estados Unidos, con intentos de enviar al ser humano a la Luna. De forma paralela al caro desarrollo de programas espaciales, el uso de sistemas robóticos baratos fue fundamental para entender el entorno espacial donde operan los astronautas, así como para facilitar el entendimiento de nuestro sistema solar.

El primer robot que funcionó en un cuerpo "extraterrestre" fue un "scoop" (una especie de robot recogedor) lanzado a bordo del Surveyor 3, que aterrizó en la Luna en el año 1967. Seguido a esto, el Programa Luna-16 lanzó con éxito el primer brazo robótico planetario con funciones similares a las de un taladro en el año 1970. Y ese mismo año sería lanzado por parte del Luna-17 un robot "rover" o "explorador" llamado Lunokhod 1. Desde 1990 se busca un mayor nivel de autonomía en los robots y de hecho muchos de los que han sido ya lanzados se consideran agentes robóticos que actúan como entes humanos en el espacio. Con el paso del tiempo las siguientes misiones espaciales necesitarían un mayor nivel de autonomía, siendo necesarios robots exploradores y robots asistentes.

1. Hitos históricos: sistemas robóticos orbitales

El primer manipulador robótico puesto en órbita fue el sistema manipulador remoto del transbordador espacial, mejor conocido como Canadarm. Demostró su éxito en la misión STS-2 en 1981 y realizó su última misión espacial en el mes de julio del año 2011. Este hito abrió una nueva era en el campo de la robótica orbital e inspiró una serie de misiones conceptuales a la comunidad investigadora. Un objetivo que se discutió intensamente después de los primeros años de la década de 1980 fue la aplicación de robots espaciales de vuelo libre al rescate y servicio de naves espaciales que han dejado de funcionar correctamente.



Ilustración 1. "The Canadarm", uno de los máximos representantes de la robótica e ingeniería canadiense, operando en la órbita terrestre. | Fuente: NASA

En años posteriores, se llevaron a cabo misiones tripuladas para la localización, reparación y posterior despliegue de satélites disfuncionales (misiones Anik-B o Intelsat 6, por ejemplo) y para el mantenimiento del conocido telescopio espacial Hubble (misiones STS-61, STS-82, STS-103 y STS-109). Para todos los ejemplos anteriores, fue necesario emplear el Transbordador Espacial, nave espacial tripulada. En cuanto respecta a las misiones de asistencia no tripuladas, mención especial merece el satélite ETS-VII, el primero de la historia en equipar un brazo robótico (de dos metros de longitud) y también la primera nave espacial no tripulada en llevar a cabo operaciones autónomas de acoplamiento de unidades con éxito. Inicialmente pensado para mantenerse

operativo por espacio de un año y medio, finalmente fue perfectamente funcional durante casi cinco, hasta caer de su órbita el 13 de noviembre del año 2015.

2. Hitos históricos: sistemas robóticos superficiales

La investigación sobre la robótica de exploración en superficie comenzó a mediados de la década de 1960, con una iniciativa -que nunca salió del Planeta- de vehículo no tripulado (rover) para los alunizajes del Programa Surveyor y un rover tripulado en los Estados Unidos, el Moon Buggy. En el mismo período, la investigación y el desarrollo de este campo dio sus primeros pasos en la antigua Unión Soviética con un vehículo teledirigido llamado Lunokhod. Ambos, el rover tripulado del programa Apollo y el vehículo no tripulado Lunokhod fueron probados con rotundo éxito a principios de los 70 en la Luna.

En la década de 1990 el objetivo de la exploración extraterrestre se había ampliado a Marte y poco más tarde en 1997, la misión del Mars Pathfinder desplegó con éxito un micro-rover llamado Sojourner, que atravesó con paso firme el campo rocoso de la zona de aterrizaje, evitando autónomamente los obstáculos a su paso. A raíz de este éxito, podemos considerar hoy en día la robótica autónoma una tecnología indispensable para la exploración planetaria. Los “exploradores hermanos” del planeta Marte -Spirit y Opportunity- se lanzaron en 2003 y contaron a sus espaldas notables éxitos en cuanto a la capacidad de permanecer operativos en el riguroso entorno de Marte durante más de seis años, en el caso del primero (3 de enero de 2004 – marzo de 2010, momento en el que dejó de enviar comunicaciones) y hasta 14, para el segundo. El gemelo Opportunity, más longevo, ha permanecido activo hasta 2018 desde su lanzamiento el 25 de enero de 2004. Más allá de las aportaciones que a la ciencia han concedido, desde el apartado técnico podemos destacar los 45 kilómetros recorridos por Opportunity sobre la superficie del ‘planeta rojo’, récord de mayor

distancia recorrida sobre un cuerpo celeste para julio de 2014.

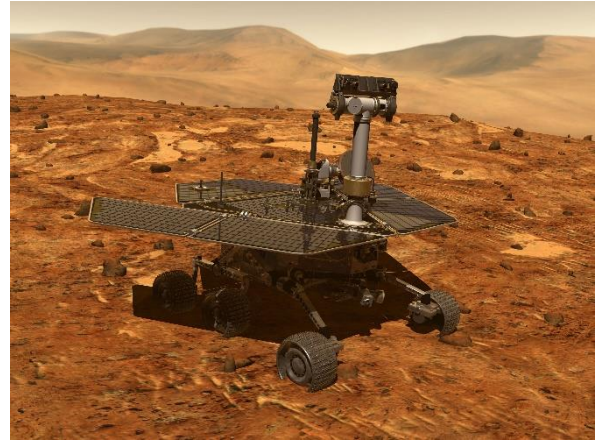


Ilustración 2. Rover "Opportunity", explorador superficial de Marte | Fuente: CNN

III. Desafíos de la Robótica Espacial. Problemas derivados de la exploración del espacio

Existen **cuatro desafíos** en la exploración espacial en cuanto a las cualidades que deben de tener los robots:

Movilidad: implica moverse de forma rápida y precisa entre dos puntos sin colisiones y sin poner en riesgo a los robots, astronautas o cualquier parte del lugar de trabajo. Conseguir esto, sobre lugares rocosos y abruptos, o simplemente desconocidos, siempre ha planteado problemas a la robótica del espacio.

Manipulación: uso de brazos y manos para manipular elementos en el lugar del trabajo de forma segura, rápida y precisa sin tocar accidentalmente otros objetos o impartir fuerzas excesivas más allá de las necesarias para la tarea.

Retardo en el tiempo: permitir que el operario a distancia ordene al robot que haga un trabajo útil con el menor tiempo de respuesta posible (que conocemos como “delay” por distancia).

- **Entornos Extremos:** el robot debe operar de forma correcta a pesar del calor, frío intenso, radiación ionizante, el vacío, atmósferas corrosivas, polvo fino, etc. Esto requiere una electrónica no convencional, como sistemas de enfriamiento más sofisticados como la inducción.

Otorgando características poco convencionales a los robots espaciales podemos solucionar estos desafíos, como se verá a continuación.

IV. Áreas tecnológicas involucradas

Estos desafíos que hemos planteado obligan a involucrar tecnologías punteras, desde el “machine learning” y la visión artificial a algoritmos de toma de decisiones, radioastronomía, comunicaciones, ciencia de materiales, telescopios, automoción, motores eléctricos, motores nucleares, paneles solares, y un largo etcétera.

En definitiva, se podría decir que la exploración espacial es un reto que involucra prácticamente todos los campos de estudio conocidos de la ciencia: física, química, ingeniería, biología, ... exigiendo lo más novedoso y efectivo en cada área para lograr un objetivo común, la exploración espacial.

V. Características de un Robot Espacial

Las propiedades de un sistema robótico surgen, por lo general, de los desafíos que éste debe ser capaz de afrontar. Podemos resumir en las siguientes las características mínimas que todo robot espacial debe satisfacer:

Movilidad: La capacidad de locomoción es particularmente importante en los robots de exploración (conocidos en el argot con el nombre de “Rovers”) pues deben ser capaces de viajar y desplazarse en la superficie de un planeta remoto. Estas superficies son naturales y abruptas, y por lo tanto difíciles de atravesar. Sentido y percepción,

mecánica de tracción, y la dinámica, el control y la navegación de los vehículos espaciales son todas tecnologías de la robótica móvil que deben dominarse en un ambiente natural inédito.

Estos robots suelen ir acompañados de sistemas autónomos que les permiten evitar obstáculos con gran variedad de sensores, que implican áreas tan complejas como la visión artificial -donde se emplean los LIDAR para cálculo de distancias y planificación de rutas-, la odometría visual, para conocer en todo momento la posición del robot, e incluso el uso de ruedas especiales que dejan marcas en la tierra para identificar la posición o cambios en el rumbo.

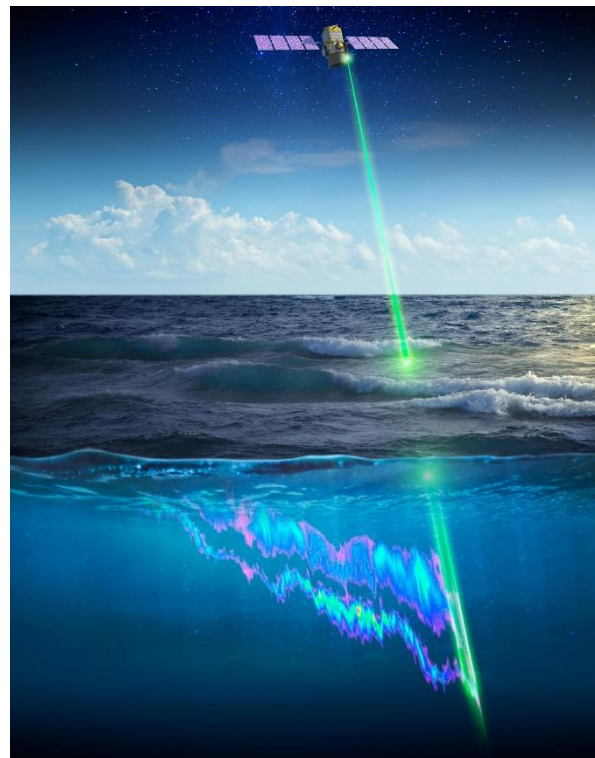


Ilustración 3. Diseño artístico que representa un satélite orbital con sensores LIDAR. | Fuente: Tim Marvel / NASA

Orientación: La mayor parte de las mediciones que se deben realizar para la exploración de una superficie planetaria se relacionan con el estado interno del robot o su posición, postura y cinemática con respecto al medio ambiente en que se ubica. Los sensores de estado interno -como los codificadores- se utilizan, acompañados de un modelo cinemático y sensores inerciales como acelerómetros y giroscopios, para estimar la

localización del robot en el espacio inercial. Los algoritmos de percepción como la reconstrucción de la superficie a partir de nubes de puntos de alcance (visión estereoscópica) permite realizar una representación de la geometría del terreno. El rumbo a seguir en el espacio inercial es generalmente la tarea más difícil de medir de manera fiable, especialmente si las herramientas de navegación y posicionamiento global son deficientes.

Manipulación: En la robótica industrial tradicional es fácil moverse a ubicaciones precisas, ya que estas son planificadas previamente para manipular herramientas o piezas de trabajo, y no se requiere excesiva precisión. En cambio, el hardware espacial suele ser muy delicado, y su posición a menudo sólo se conoce aproximadamente en términos de la información recibida desde el mismo espacio exterior. El espacio de trabajo puede estar ocupado por el terreno natural, por componentes de naves espaciales o por los mismos astronautas. Si un supuesto brazo robótico es lo suficientemente fuerte como para realizar tareas útiles y es lo suficientemente rápido como para trabajar en cooperación con astronautas humanos, entonces también es un arma de doble filo, pues representa un tremendo peligro tanto para los componentes de la nave espacial como para los astronautas humanos y también para sí mismo, por lo que se necesitan sensores de detección avanzados para identificar y realizar un seguimiento de qué partes del volumen de trabajo están ocupadas, donde y como se deben manipular las piezas de trabajo, así como la detección de colisiones inminentes.

Un mayor uso de la seguridad es necesario para permitir trabajar en cooperación entre robots y humanos en espacios de trabajo donde se requiera tanto la fuerza como la destreza y el ingenio.

Teleoperación y autonomía: Existe un retraso de tiempo significativo entre un sistema robótico en un lugar de trabajo y un operador humano en una operación en la Tierra. En las primeras demostraciones sobre robótica orbital, la latencia era típicamente de cinco segundos, pero puede ser

de varias decenas de minutos, o incluso tratarse de horas en el caso de las misiones planetarias. La tecnología de la telerobótica es, por lo tanto, un ingrediente indispensable en el ámbito de la robótica espacial, y la dotación de autonomía a los sistemas es una consecuencia razonable en este sentido. En los ambientes extremos – al margen del entorno de microgravedad que influye en la dinámica del manipulador, o el terreno accidentado que afecta notablemente a la movilidad en superficie, como se ha comentado-, hay una serie de cuestiones relacionadas con los ambientes espaciales extremos, que son desafiantes y deben ser resueltas para permitir a la ingeniería llevar a la práctica estas aplicaciones. Entre ellas se encuentran las extremadamente altas o bajas temperaturas, el vacío o la alta presión, atmósferas corrosivas, radiación ionizante, y el fino polvo espacial, entre muchos otros.

Imaginemos de nuevo que exploramos un océano de agua en Europa, luna de Júpiter. El retardo para mandar comandos al robot sería de días; por tanto, cuando solo nos podemos comunicar con él una o dos veces a la semana, entra en juego el control supervisado: el robot será autónomo y recibirá las órdenes de vez en cuando sobre qué hacer, el resto del tiempo se servirá de sus sensores para la toma de decisiones.

VI. Aplicaciones de los Robots Espaciales

1. Tipos de Robots Espaciales

- **Robots de órbitas bajas:** Órbita baja es aquella comprendida entre 300 y 700km de altitud, distancia que permite reducir los costes de lanzamiento y además existen condiciones de ingravidez. En ella se encontraba la estación rusa MIR y es donde se encuentra actualmente la Estación Espacial Internacional. Hay dos tipos:
 - **Robots internos:** robots que se encuentran dentro de la Estación Espacial y de los transbordadores y que permiten automatizar el transporte y la manipulación de materiales en los diferentes experimentos realizados.
 - **Robots externos:** robots que llevan a cabo sus operaciones fuera de la Estación Espacial o el transbordador.
- **Robots exploradores:** Son aquellos robots móviles que tras aterrizar gracias a una nave y haciendo uso de instrumentos de medida y sensores, son capaces de explorar el lugar con un mayor o menor grado de autonomía. Han sido empleados en misiones a Marte y a la Luna por parte de las agencias soviéticas y americana para recabar información de estos lugares.

2. Principales exponentes de la Robótica Espacial

a) Robots orbitales:

- **Sistema Manipulador Remoto del Transbordador Espacial (SRMS, Canadarm):** a bordo del Transbordador Espacial, el manipulador remoto del transbordador (SRMS), o Canadarm, fue un brazo mecánico capaz de maniobrar una carga útil desde el muelle de carga (espacio útil para carga y descarga de material) a su posición de despliegue y posteriormente, liberarla. Asimismo, también puede lidiar con la tarea de trasladar una carga útil en vuelo libre hasta el muelle de carga del transbordador. El

SRMS se utilizó por primera vez en la segunda misión del Transbordador Espacial (STS-2), lanzada en 1981. Desde entonces, se utilizó en multitud de ocasiones en misiones de vuelo del transbordador espacial, realizando dicho despliegue de carga útil o de estacionamiento de carga, así como la asistencia a las actividades humanas extravehiculares (EVAs). Misiones de servicio y mantenimiento al telescopio Hubble y tareas de construcción de la Estación Espacial Internacional también han sido llevadas a cabo con éxito a partir del uso cooperativo del SRMS con EVAs humanos. Tal y como se aprecia en la ilustración, el brazo del SRMS tiene 15 metros de largo y dispone de seis grados de libertad, que son: articulación de hombro (dos grados de libertad en “yaw” [eje Y] y “pitch” [eje X]), codo (un grado de libertad en “pitch” [eje X]) y muñeca (tres grados de libertad en “pitch” [eje X], “yaw” [eje Y] y “roll” [eje Z]). Acoplado al final del brazo encontramos un mecanismo de agarre especial llamado “Efector Estándar Final” o, en inglés, “Standard End Effector” (SEE). Además, si se fija un punto de apoyo en el extremo final, el brazo puede servir como plataforma móvil para las actividades extravehiculares de un astronauta. Después del accidente del transbordador espacial COLUMBIA durante la misión STS-107, la NASA equipó al SRMS con el Sistema de Brazo Orbital de Sensores (“Orbital Boom Sensor System”, OBSS), un brazo que contiene instrumentos para inspeccionar el exterior del transbordador a fin de detectar daños en el sistema de protección térmica.

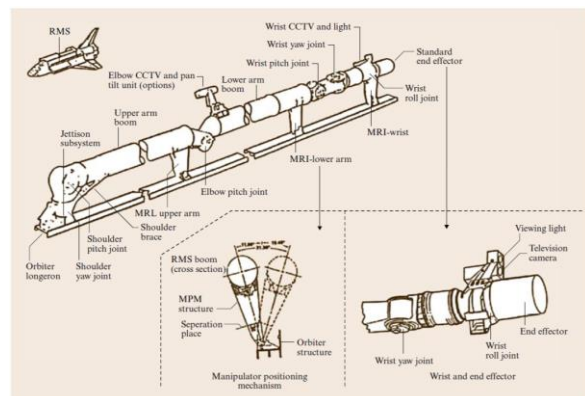


Ilustración 4. Representación gráfica del SRMS (Canadarm)
/ Fuente: Robots and Systems (K. Yoshida y B. Wilcox)

- **Sistemas Manipuladores de la Estación Espacial Internacional (ISS):** la Estación Espacial Internacional (ISS) es el mayor proyecto tecnológico como centro de investigación en la órbita terrestre, cuya administración depende de la cooperación internacional. Asimismo, la ISS es un manifiesto de la presencia humana en el espacio, así como un laboratorio espacial con importantes instalaciones para la ciencia, la ingeniería y la investigación. A fin de facilitar diversas actividades en la estación, se cuenta con varios sistemas robóticos. El sistema de manipulación remota de la estación espacial (SSRMS) o Canadarm 2, es la nueva generación del SRMS, para su uso en la ISS. Lanzado en 2001 durante el STS-100 (vuelo de ensamblaje 6A de la ISS), el SSRMS ha jugado un papel clave en la construcción y mantenimiento de la ISS tanto asistiendo a los astronautas en diferentes actividades extravehiculares, como usando el SRMS en el transbordador espacial para entregar una carga útil del transbordador espacial al SSRMS. El brazo tiene 17,6 metros de largo cuando está completamente extendido y tiene siete grados de libertad. Los efectores, a través de los cuales se puede transmitir energía, datos y vídeo hacia y desde el brazo, están unidos a ambos extremos del mismo. El SSRMS es auto-reubicable, usando una especie de ‘movimiento de gusano’ con diferentes puntos de apoyo y agarre. Como otra ayuda de movilidad para que el SSRMS cubra áreas más amplias de la ISS, un sistema de base móvil (MBS) fue añadido en 2002 por el STS-111 (vuelo de ensamblaje de la ISS UF-2). El manipulador especial de destreza (SPDM), o Dextre, que se anexiona al final del SSRM, es un sistema de mini-brazo capaz de facilitar las delicadas tareas de ensamblaje de las que se encargan actualmente los astronautas durante las EVAs. El SPDM es un sistema manipulador de doble brazo, donde cada manipulador tiene siete grados de libertad y está montado en un cuerpo articulado con un solo grado de libertad. Cada brazo tiene un conjunto especial de herramientas dedicado a la sustitución de unidades. Los brazos son teleoperados desde una estación de trabajo robótica (RWS).

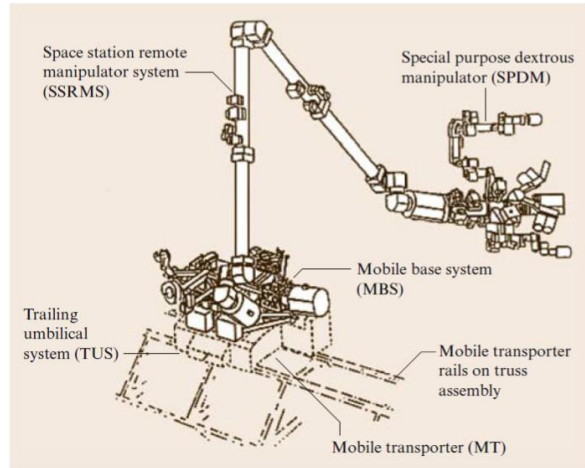


Ilustración 5. Representación gráfica del SSRMS (Canadarm 2). | Fuente: Robots and Systems (K. Yoshida y B. Wilcox)

La Agencia Espacial Europea (ESA) ha proporcionado también un sistema manipulador robótico a la ISS, el Brazo Robótico Europeo (ERA), que se ha utilizado desde su implantación en 2009 para acoplar y sustituir placas solares, revisar y ensamblar módulos y para trasladar a los astronautas que realizan los paseos espaciales. Se trata de un brazo de 11,3 metros de longitud y con siete grados de libertad. Su estructura básica y funcionalidad son semejantes a las de SSRMS.

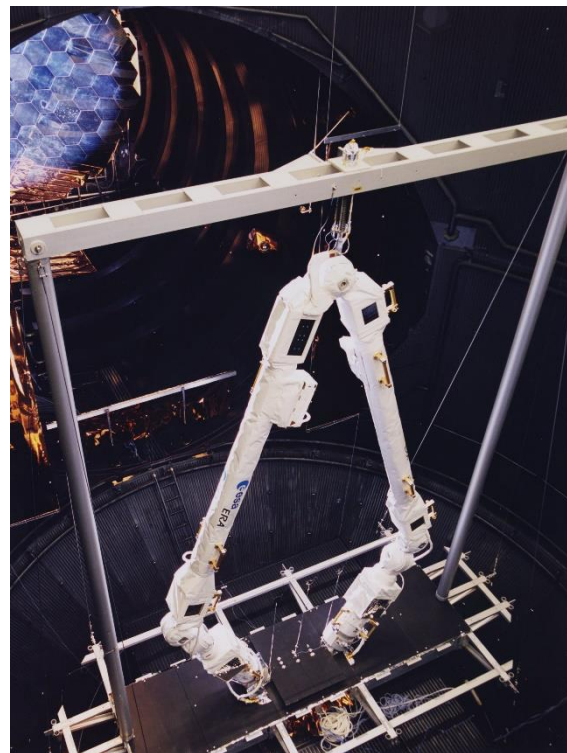


Ilustración 6. Imagen del European Robotic Arm (ERA)

Otros ejemplos también importantes de manipuladores de la ISS los encontramos en el ROVKISS, desarrollado por la Agencia Aeroespacial Alemana (un brazo de 0,5 metros de longitud y dos grados de libertad) y el JEMRMS, confeccionado en la Agencia de Exploración Espacial de Japón (JAXA). Este último consta de dos componentes principales: un brazo principal, de 9,9 metros de longitud y seis grados de libertad, y un brazo secundario, de 1,9 metros de largo y seis grados de libertad, como el anterior. A pesar de sus 12 grados de libertad en conjunto, el brazo principal no cuenta con auto-reubicación, a diferencia del SSRMS o el ERA, anteriormente citados.

- **ETS-VII:** el Satélite de Pruebas de Ingeniería ETS-VII fue otro hito en el desarrollo de la robótica en el espacio, en particular en el área de los satélites de mantenimiento. El ETS-VII era una nave espacial no tripulada desarrollada y lanzada por el NASDA, actualmente JAXA, en noviembre de 1997. Un buen número de experimentos fueron realizados con éxito usando este manipulador de dos metros de largo y seis grados de libertad, montado en un satélite. El objetivo de la misión de ETS-VII era probar la tecnología de vuelo robótico libre y demostrar su utilidad en la operación orbital no tripulada y en las tareas de servicio espacial. La misión consistía en dos subtareas: una primera autónoma de localización y acercamiento (RVD) y una posterior consistente en una serie de experimentos con robots (RBT). En los experimentos con robots podemos incluir:

- Teleoperación desde la Tierra, afrontando el gran problema de retraso de tiempo (delay).
- Demostraciones en tareas de servicio robótico como cambio y despliegue de una estructura espacial.
- Control dinámicamente coordinado entre la reacción del manipulador y la respuesta del satélite.
- Localización y aterrizaje en un satélite objetivo.

- **Orbital Express:** El programa de operaciones espaciales Orbital Express es un proyecto iniciado por la DARPA (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de los Estados Unidos) para la validación de la viabilidad técnica de operaciones de reabastecimiento robótico en órbita y reconfiguración de los satélites, así como la localización autónoma, acoplamiento, y aterrizaje de manipuladores. El sistema consiste en el transporte espacial autónomo de operaciones robóticas (ASTRO), desarrollado por Boeing Integrated Defense Systems y el satélite modular NextSat, desarrollado por Ball Aerospace. El vehículo ASTRO fue equipado con un brazo robótico para realizar la captura del satélite y las operaciones de recambio de unidades necesarias. Tras su lanzamiento en marzo de 2007, varias misiones se han llevado a cabo en diferentes escenarios, incluyendo:

- Inspección visual, transferencia de combustible e intercambio de unidades en NextSat usando el brazo manipulador de ASTRO cuando ambas naves espaciales están conectadas.
- Separación del NextSat de ASTRO, maniobras orbitales y vuelos de localización y acoplamiento con NextSat.
- Captura del NextSat usando el brazo manipulador de ASTRO.

Estos escenarios se completaron con éxito para julio de 2007, con avanzados sistemas de autonomía equipados en ASTRO, como cámaras de a bordo y un sistema de guía de video. Poco después, la misión tocó su fin.

b) Robots superficiales (Rovers):

- **Rovers Teleoperados. Lunokhod:** El primer vehículo robótico de superficie operado a distancia fue el Lunokhod. El Lunokhod 1 aterrizó en la Luna el 17 de noviembre de 1970 como una carga útil del módulo de aterrizaje Luna-17 y el Lunokhod 2 alunizó el 16 de enero de 1973. Podemos describir ambos sistemas robóticos como vehículos superficiales de ocho ruedas con tracción antideslizante y una masa de unos 840 kilogramos, donde casi todos los componentes se encontraban en una 'bañera termal' presurizada y tapada para permitir la supervivencia de éstos al frío profundo (≈ 100 K) de las largas noches lunares. En su interior encontrábamos una serie de placas solares, que recargaban las baterías durante el día según se requería para mantener el funcionamiento del rover. Lunokhod 1 operó durante 322 días terrestres, recorriendo más de 10,5 km durante ese período y devolvió más de 20.000 imágenes de televisión, 200 panorámicas de alta resolución, y los resultados de más de 500 pruebas de penetración de suelo y 25 análisis de materiales utilizando su espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Lunokhod 2 operó durante unos 4 meses, habiendo recorrido más de 37 km, terminando oficialmente su misión el 4 de junio de 1973. Se informó que Lunokhod 2 se perdió prematuramente cuando empezó a deslizarse por la ladera de un cráter, lo que finalmente causó el fin de la misión.

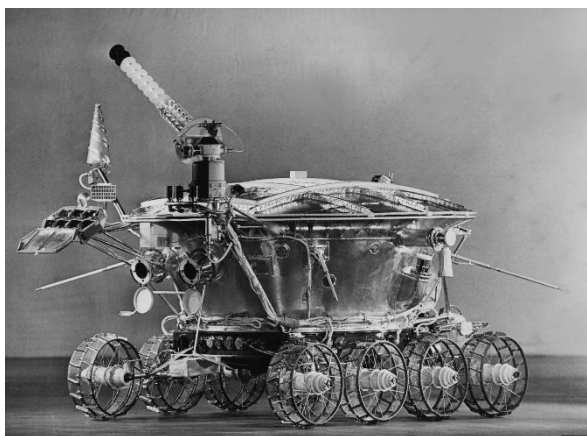


Ilustración 7. Imagen del rover Lunokhod 1 | Fuente: NASA

Cada una de las ocho ruedas de los vehículos Lunokhod sumaban 0,51 m de diámetro y 0,2 m de ancho, dando una presión efectiva sobre el

suelo de menos de 5 kPa, con un hundimiento de 3 cm. Como curiosidad, cada rueda tenía un mecanismo de desconexión del cuerpo del robot que le permitía liberarse en caso de que algún problema aconteciese con el motor o en los engranajes. Las órdenes de movilidad dadas al vehículo incluían un sistema de dos velocidades hacia adelante o hacia atrás, freno y giro a la derecha o a la izquierda, ya sea en movimiento o en estático.

Los vehículos equipaban tanto giroscopios como acelerómetros sensores de inclinación que podrían detener automáticamente al robot en caso de una inclinación excesiva del chasis. En cuanto a odometría (posición espacial del robot), la distancia sobre el terreno se determinaba por obra de una novena rueda de pequeño tamaño, ligeramente cargada. Asimismo, disponía de un sistema de detección de sobrecarga de corriente y medidores de cabeceo y balanceo, y distancia recorrida. Las temperaturas de muchos componentes se determinaban por telemetría.

Aunque la operación se encontró con diferentes obstáculos en sus etapas iniciales, en parte por la deficiente iluminación de la Luna y la modesta calidad de las imágenes de televisión de la época, y asimismo por un aterrizaje más complicado de lo esperado, en los primeros tres meses de funcionamiento, el vehículo recorrió 5224 metros en 49 horas de conducción, recibiendo 1695 comandos de conducción, incluyendo unos 500 giros. Dieciséis señales fueron enviadas por el robot para protegerse contra la inclinación excesiva; aproximadamente 140 cráteres fueron atravesados en ángulos de inclinación máximos de 30° . El valor medio de deslizamiento de las ruedas durante los primeros tres días lunares (mes y medio terrestre, aproximadamente) fue alrededor del 10%.

- **Rovers Autónomos. Programa Surveyor, Sojourner, Mars Rover, Humvee, Robby, Ambler, Mars Pathfinder, Spirit, Opportunity, Rocky-7:** A mediados de la década de 1960, comienza la investigación de un nuevo vehículo lunar en el laboratorio estadounidense JPL, en

Pasadena, California. Se propone enviar un pequeño rover en los alunizajes del Programa Surveyor. Estos alunizajes fueron consecuentemente dirigidos por JPL y diseñados para aterrizar suavemente en la Luna a fin de evaluar y garantizar la seguridad de los viajes espaciales posteriores del Proyecto Apollo, con humanos a bordo.

Con este propósito, Bekker, padre de la locomoción todoterreno, y su equipo, propusieron un vehículo articulado de seis ruedas después de experimentar con muchos tipos de vehículos. En las pruebas del modelo a escala, el vehículo de seis ruedas demostró un rendimiento superior sobre el resto de prototipos, y también se mostró implacable en terreno rocoso. Construyeron y entregaron dos vehículos que medían alrededor de 2 metros de largo con aproximadamente 0,5 metros de diámetro por rueda. Esos vehículos fueron usados en pruebas durante los años 60 y a principios de los años 70 para llevar a cabo operaciones simuladas con objeto de determinar cómo podrían utilizarse realmente este tipo de vehículos en la Luna.

Tras el exitoso descubrimiento de que todos los aterrizajes se realizaban sin problemas sobre suelo firme, se concluyó que el explorador lunar del Programa Surveyor ya no era necesario. Como consecuencia, el prototipo se reservó a la investigación a principios de 1970 y posteriormente fue restaurado para su uso de nuevo en la década de 1980, convirtiéndose en el primer vehículo equipado con navegación por puntos de ruta que se usó más tarde en las misiones Sojourner y MER.

No sería hasta 1984 cuando JPL comenzara a centrar sus esfuerzos en el desarrollo del Mars Rover. Se desarrollaron dos vehículos en un banco de pruebas, un prototipo de software y un prototipo de hardware. El prototipo de software contaba además con un brazo de Stanford, un brazo robot eléctrico articulado de seis ejes (inventado por V. Scheinman). La primera locomoción coordinada “mano-visión” se realizaría con este vehículo, diseñando una roca

artificial y haciendo al vehículo maniobrar de forma autónoma hasta el punto en que el brazo podía extenderse y recogerla. El prototipo de hardware era alimentado por un sistema de baterías y controlado por un control remoto común, no muy distinto del que puede utilizar cualquier aficionado.

A finales de 1982, JPL tenía un contrato con el ejército de los Estados Unidos para estudiar el uso de los vehículos robóticos en el servicio espacial. Durante este estudio, Brian Wilcox en JPL propuso una técnica para reducir la necesidad de un enlace de vídeo en tiempo real entre el vehículo y el operador (esta técnica recibe el nombre de CARD). Así, la cantidad de información que debía ser transmitida por el vehículo se redujo en órdenes de magnitud. Durante las pruebas de campo en el Desierto de Mojave en 1988, la tecnología CARD fue probada en el robot Humvee. Su moderado éxito condujo a nuevos esfuerzos financiados por la NASA, que lideró al desarrollo de un nuevo vehículo, llamado Robby. Éste era un vehículo tan grande que podía llevar un sistema de computación integral a bordo y contaba con la energía necesaria para una misión sin ataduras. Sin embargo, aquél era precisamente el principal problema de Robby, que se percibía como un vehículo de enormes proporciones, característica precisamente no deseable en los viajes espaciales, por lo que no caló en la comunidad científica.



Ilustración 8. Rover "Robby" [años 90] / Fuente: NASA (JPL)

Más o menos al mismo tiempo, la NASA financió a la Universidad Carnegie-Mellon para desarrollar el Ambler, un gran robot andante capaz de elegir lugares seguros donde pisar. No obstante, tenía el mismo problema que Robby, sumado a que la comunidad de administradores de la NASA era muy escéptica respecto a si esos grandes sistemas podrían ser enviados de manera “asequible” a Marte.

Poco después, la misión Pathfinder se propuso como una primera prueba de desarrollo de una red de unas 16 a 20 estaciones para proporcionar una cobertura global de Marte. En seguida, un pequeño rover fue propuesto al grupo de trabajo científico de Marte para las primeras exploraciones. Un esfuerzo de desarrollo a muy corto plazo culminó en una demostración en julio de 1992 de un rover de 4 kilogramos que podía moverse a puntos dirigidos en la superficie cercana al módulo de aterrizaje. El rover del Pathfinder fue más tarde llamado Sojourner, y se convirtió en el primer vehículo autónomo en atravesar la superficie de otro planeta, utilizando un sistema de detección y evitación de obstáculos para moverse con seguridad sobre un terreno rocoso. Sojourner operó con éxito durante 83 días marcianos (hasta el fallo del módulo de aterrizaje). En su viaje, examinó aproximadamente una docena muestras de rocas y suelos, que dieron una primera aproximación de campo a la composición elemental de las rocas y el suelo marciano. El éxito del Sojourner llevó directamente a la decisión de construir los rovers gemelos de exploración de Marte -Spirit y Opportunity-, lanzada en 2003.

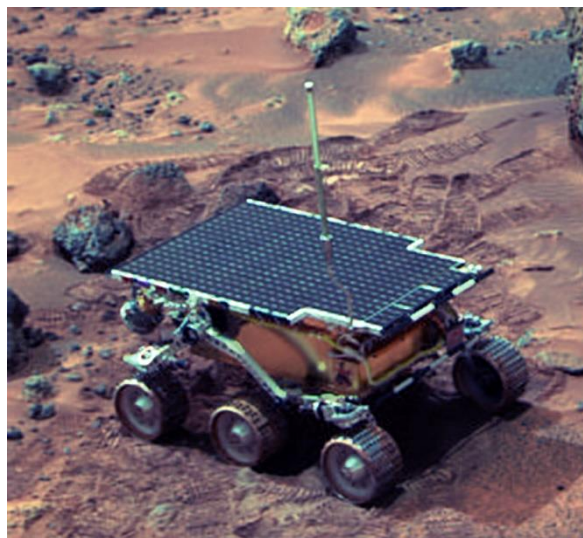


Ilustración 9. Sojourner en Marte. | Fuente: NASA (JPL)

En la década de 1980, la mayoría de las investigaciones de detección de los rovers planetarios se basaba en un láser de determinado alcance o en sistemas de visión estereoscópica. La visión estereoscópica era computacionalmente agresiva para los primeros ordenadores de baja potencia, así que el rover Sojourner que viajó a Marte usó una forma simple de láser para determinar qué áreas del planeta eran seguras de atravesar. Entre el lanzamiento del Sojourner (1996) y los exploradores de Marte (2003) se habían hecho suficientes progresos en la resistencia a la radiación de los procesadores, para que la visión estereoscópica fuese utilizada en los sistemas de detección de los rovers de exploración de Marte (MER), principalmente en experimentos realizados con el rover Rocky-7.

VII. Objetivos tecnológicos y retos. Misiones Espaciales futuras

1. Metas tecnológicas y desafíos

Cada vez son más las naciones que buscan aportar a este conocimiento sobre el espacio y probar sus tecnologías para este fin, además de los esfuerzos comerciales con ojos puestos en la Luna y Marte como posibles destinos para ser visitados e incluso habitados por los humanos. De este modo, estos robots a los que nos referimos pueden ser una gran ventaja para lograr estas metas.

La NASA ha identificado algunas nuevas áreas de la robótica que se necesitarán para el 2035. Del mismo modo, la ESA ha estado desarrollando hojas de ruta tecnológicas a través de varios proyectos financiados por la Comisión Europea como PERASPERA o SpacePlan2020. Naciones como Rusia, China, India y Japón han anunciado también sus planes individuales en futuras misiones que involucran robots espaciales. Existen una serie de necesidades tecnológicas y desafíos que están en conocimiento de la comunidad espacial internacional y abren las puertas a la investigación espacial en los años venideros.

2. Beneficios, oportunidades y futuras misiones espaciales.

La exploración espacial presenta una gran oportunidad para desarrollo tecnológico y, por suerte, los intereses de empresas privadas ahora alcanzan también las misiones espaciales. Por ejemplo, la empresa de Jeff Bezos, Amazon, planea colonizar Marte con huertos, casas y granjas repartidos en cápsulas pero el factor limitante son los costes de lanzamiento, cosa que la empresa de Elon Musk, SpaceX quiere solucionar. En la actualidad, trabaja con lanzaderas reutilizables para mandar satélites y recursos a la Estación Espacial Internacional, abaratando los costes por lanzamiento.

En cuanto a las futuras misiones espaciales, son particularmente destacables las siguientes:

- **ExoMars Fase 2:** es la única misión financiada por Europa que hace un uso substancial de sistemas RAS a través de un rover autónomo. La primera fase fue lanzada en 2016 mientras que la segunda, prevista para este año 2020, ha sido aplazada hasta 2022.
- **Mars Sample Return:** programa de exploración de Marte con la finalidad de recoger muestras de su superficie.

- **Martian Moon (Phobos) Sample Return:** su principal objetivo es recoger muestras de la superficie de Fobos, la luna más grande de Marte. Para ello se busca emplear elementos robóticos capaces de muestrear la superficie bajo los efectos de una reducida gravedad. La misión se planea para el año 2022, aproximadamente.
- **Juice (JUPiter ICy Moon Explorer):** un estudio en profundidad de Júpiter así como de los satélites helados jovianos, especialmente Ganímedes, Europa y Calisto. Se planea el lanzamiento de la misión en el año 2022, llegando al sistema joviano en el año 2030.
- **Artemisa:** misión de los EE.UU., en busca de regresar a la Luna. Donald Trump anunció que la NASA tenía que volver al satélite de la Tierra y ha puesto en marcha el proyecto, que lleva por nombre Artemisa, diosa griega de la Luna, y llegará al Polo Sur de este satélite en 2024.



Ilustración 10. Recreación artística del vehículo ExoMars. / Fuente: ESA

Se plantean otras futuras misiones orbitales con necesidad de robots más avanzados para la franja comprendida entre el 2025 y el 2035. La estación espacial internacional (ISS), por otro lado, representa una excelente oportunidad para que la experimentación científica sea llevada a cabo en el espacio aprovechando la presión y características únicas del entorno.

VIII. Referencias

- [1] Kazuya Yoshida y Brian Wilcox - Space Robots and Systems.
https://www.researchgate.net/publication/226839541_Space_Robots_and_Systems
- [2] Brian Wilcox, Robert Ambrose, Vijay Kumar – Space Robotics.
<http://www.wtec.org/robotics/report/03-Space.pdf>
- [3] UKRAS - Space Robotics & Autonomous Systems : Widening the horizon of space exploration
https://www.ukras.org/wp-content/uploads/2018/10/UK_RAS_wp_Space_080518.pdf
- [4] Iñaki Navarro Oiza [ETSIT. UPM] – Robots en el Espacio
<http://www.robolabo.etsit.upm.es/~inaki/coursework/espacio.pdf>