

Estudio de los Mars Exploration Rover

Hardware y algoritmo

Ingeniería Robótica
Robots Móviles

Ahumada Sánchez, Daniel
Fernández Sánchez, Inés
Gimeno Navas, Christian
Pérez Torregrosa, Daniel

Índice

1 - Introducción	2
2 - Objetivo	2
3 - Hardware	3
3.1 - Cuerpo de los robots	3
3.1.1 - Dimensiones	3
3.1.2 - Algunas diferencias	3
3.2 - Procesador y memoria	4
3.2.1 - Opportunity	4
3.2.2 - Curiosity	4
3.2.3 - Mars 2020 (Perseverance)	5
3.3 - Sensores	5
3.3.1 - Opportunity	5
3.3.2 - Curiosity	9
3.3.3 - Mars 2020 (Perseverance)	14
3.4 - Sistema de movimiento	17
3.4.1 - Opportunity	17
3.4.2 - Curiosity y Mars 2020 (Perseverance)	18
3.4.3 - Sistema de suspensión	18
3.4.4 - Velocidad	19
4 - Software	19
4.1 - Estimación de la posición y orientación	19
4.2 - Navegación	21
4.3 - Investigación de un objetivo	22
4.3.1 - Seguimiento del objetivo	23
4.3.2 - Posicionamiento	24
4.3.3 - Despliegue del brazo	24
4.4 - Detección de eventos científicos	25
4.5 - Predicción del terreno	26
4.6 - Comunicación con la Tierra	26
5 - Los siete minutos del terror	27
6 - Ingeniería inversa	28
7 - Vídeo de presentación	31
8 - Bibliografía	32

1 - Introducción

Se ha decidido investigar en profundidad los robots de exploración de Marte, conocidos como rovers. Se han escogido estos tipos de robots ya que son el mayor ejemplo de importancia en la autonomía de estos debido a la comunicación tan lenta que sufren por culpa de la distancia que hay con la operación de control.

El trabajo consiste en conocer la parte física de estos (hardware) y la parte computacional (software), además de dos apartados importantes como el aterrizaje de este en Marte y el funcionamiento mediante ingeniería inversa por parte de distintos investigadores.

El estudio del hardware se ha realizado para conocer el funcionamiento de los sensores, el sistema de movimiento y el soporte del robot, así como su procesador. En cuanto al estudio de software se han estudiado los algoritmos de la navegación del robot, la estimación de su ubicación y la investigación de los elementos que encuentre.

2 - Objetivo

Este proyecto se escribió con la finalidad de analizar, desde el punto de vista técnico, uno de los robots más conocidos actualmente.

El campo de la robótica espacial es un área en el que la necesidad de utilizar robots como los rovers se comprende debido a las condiciones que se dan fuera de la Tierra. En este trabajo se analiza tanto la parte hardware como la parte software que utilizan para poder desenvolverse en este entorno.

Las diferentes características de estos robots les permiten a su vez ser controlados remotamente por los expertos y poder enviar las pruebas recogidas en Marte para poder avanzar en las investigaciones.

A su vez, se analizan los diferentes algoritmos que utilizan para desplazarse y navegar por el terreno mientras busca elementos que aporten información sobre este planeta. Estos algoritmos ayudan a los robots a localizarse y saber cómo moverse por el área desarrollando técnicas para acercarse a los datos y recogerlos.

Además, también se analizan diferentes trabajos que buscan acercarse a los modelos originales de los rovers, utilizando ingeniería inversa, creando sus propios algoritmos en base a lo que se puede observar de ellos.

3 - Hardware

3.1 - Cuerpo de los robots

El cuerpo de los rovers permite sujetar las distintas herramientas y sensores que necesitan.

El cuerpo de estos robots se llama WEB (Warm Electronics Box). Es una parte robusta que protege la parte electrónica y el ordenador de estos sistemas. Además también mantiene una temperatura estable para no estropear el equipo.

Las temperaturas en Marte pueden disminuir hasta los -105°C y algunos componentes como las baterías son especialmente sensibles no pudiendo soportar estas temperaturas, por lo que se mantienen resguardados en un espacio llamado Rover Equipment Deck [1].

3.1.1 - Dimensiones

Las dimensiones del Curiosity [2][3] y del Perseverance [4] cuentan con $3 \times 2.7 \times 2.2$ m (largo x ancho x alto). El robot Opportunity [5] es un poco más pequeño con $1.6 \times 2.3 \times 1.5$ m (largo x ancho x alto).

El peso del robot Curiosity es de unos 900 kg mientras que el Mars 2020 pesa 1025 kg y el Opportunity 1062 kg.

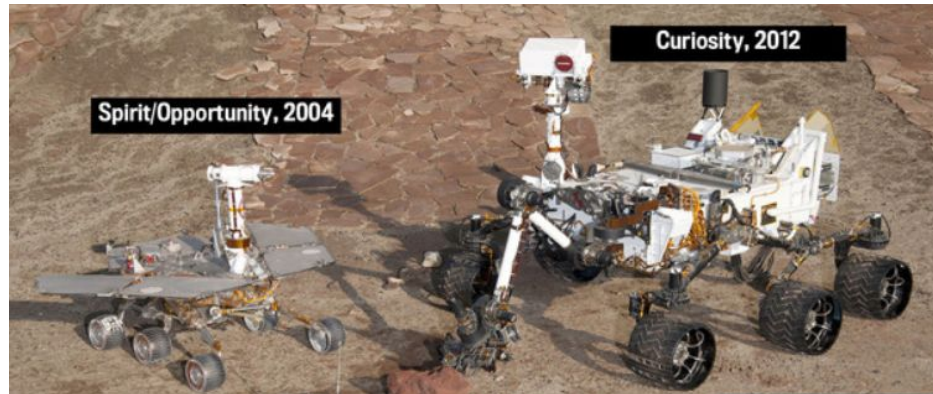


Figura 1 - Comparación entre tamaño Opportunity y Curiosity

3.1.2 - Algunas diferencias

El brazo del robot Perseverance tiene una mano de mayor dimensión que su antecesor. Además, en ella se encuentran varias herramientas, de las que se hablará más adelante, con las que no contaba el Curiosity como una cámara para fotografiar con la que también se puede observar el propio estado del robot.

Otra de las diferencias entre ambos robots es que el Perseverance recoge los núcleos de las rocas y las guarda para un futuro estudio por parte de científicos mientras que el Curiosity estudia las muestras en el momento, usando la tecnología del propio robot. [6]

3.2 - Procesador y memoria

El procesador de los rover se encarga de tratar la información de los sensores y de calcular la odometría del propio robot para conocer su posición y guardar la información recolectada de su entorno, para comunicar a la Tierra o actuar en consecuencia a sus algoritmos. Hay que tener en cuenta que ciertos movimientos los hace automáticamente gracias al procesador, ganando autonomía y reduciendo el tiempo de espera necesario para teleoperarlos, que ronda entre los 3 minutos a los 22 [7].

Su memoria se utiliza para guardar la información que ha obtenido por sus sensores y poder enviarla posteriormente o ser procesada por el procesador. Puede ser volátil o no volátil, a continuación se verán las diferencias entre los rover [8][9][10] y la explicación de cada hardware.

3.2.1 - Opportunity

CPUs	RAM	Flash	EEPROM
20 Mhz	128 MB	256 MB	3MB

Tabla 1 - Características procesador y memoria Opportunity

CPU (Central Processing Unit): Se trata del procesador, el cual interpreta las instrucciones y algoritmos mediante operaciones aritméticas.

RAM (Random Access Memory): Memoria principal, donde almacena de forma volátil los datos de los programas que se utilizan en ese momento con una gran velocidad.

Memoria flash (DRAM): Derivado de la memoria EEPROM. Almacena grandes cantidades de datos en un espacio reducido de forma no volátil. Permite la lectura y escritura en varias posiciones de memoria.

EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory): Chip de memoria que retiene su contenido sin energía. Más lento de grabar que en la RAM, funciona como esta pero no volátil.

3.2.2 - Curiosity

CPUs	RAM	Flash	EEPROM
200 Mhz	256 MB	2 GB	256 KB

Tabla 2 - Características procesador y memoria Curiosity

Las diferencias en memoria respecto a las características con el Opportunity hacen al Curiosity más capaz en cuanto a velocidad (mayor velocidad en memoria DRAM y

dependiendo menos de la EEPROM). Además de hacer operaciones 10 veces más rápido que su predecesor.

El Curiosity tiene unas unidades de medida inercial (IMU) que proveen información en de la posición de este en los tres ejes, permitiéndole realizar movimientos precisos en cualquiera de estos. El sistema empotrado de este le permite comprobar sus estados constantemente y prepararse para las comunicaciones teleoperadas, cómo tomar imágenes, navegar u operar ciertos instrumentos.

3.2.3 - Mars 2020 (Perseverance)

CPUs	RAM	Flash	EEPROM
200 Mhz	256 MB	2 GB	256 KB

Tabla 3 - Características procesador y memoria Perseverance

El sistema del Perseverance es el mismo que el Curiosity en cuanto a procesador y memoria. Se puede observar un resumen de las características en la tabla anterior (Tabla 3).

3.3 - Sensores

La información proporcionada por los MER es primordial para su funcionamiento (y su autonomía) así como para el objetivo principal de la misión de estos, proporcionar información sobre la posibilidad de la vida en Marte, su clima y geología, y la preparación para la posible exploración humana.

3.3.1 - Opportunity

El Opportunity cuenta con 17 cámaras de 1600x1200 píxeles. Varias de estas se encargan de dar información sobre la superficie terrestre en forma de imagen, como las HazCams (para evitar el peligro), las NavCams (para navegar) o la MastCam (proporciona las imágenes principales a color). Otras se tratan de cámaras científicas, principalmente utilizadas para el análisis de ciertos elementos, por ejemplo, el Microscopic Imager, Mini-TES o el APXS [11]:

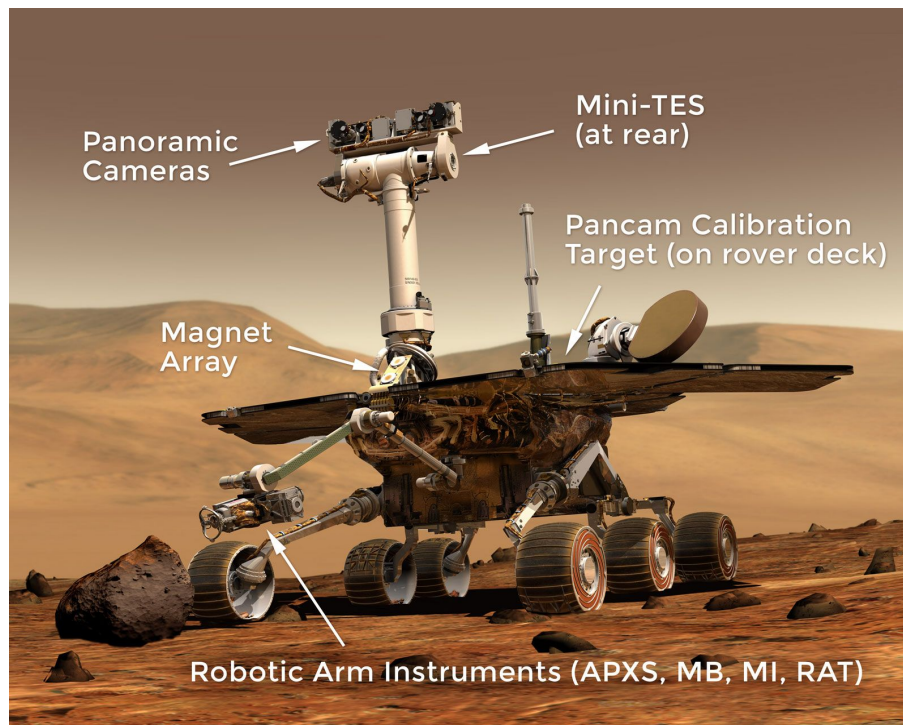


Figura 2 - Disposición sensores Mars Opportunity Rover

- Panoramic Camera (Pancam): Dos cámaras que toman detalladamente el terreno que rodea al rover. Estas cuentan con varios filtros para poder tomar imágenes del cielo o el sol con distintas longitudes de onda.

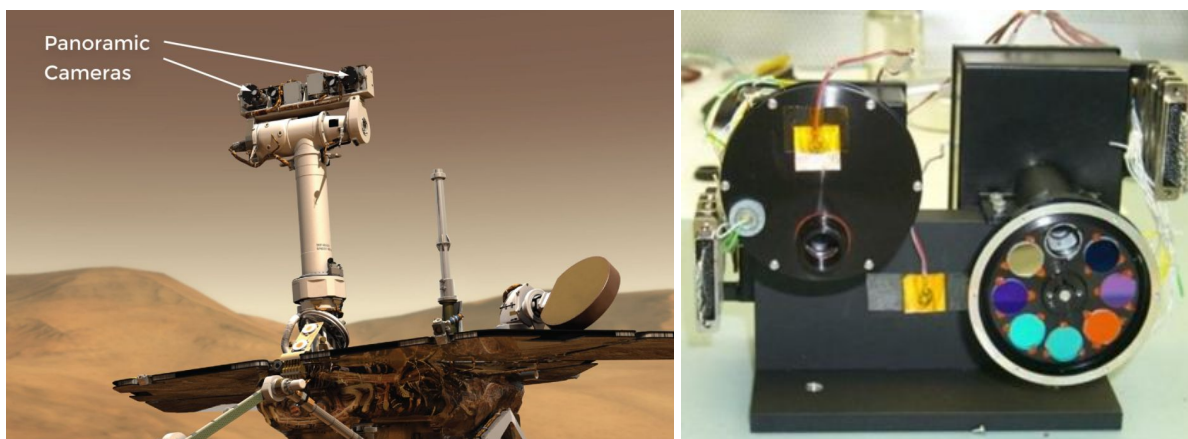


Figura 3 - Pancam y filtros que la componen

- Microscopic Imager (MI): Cámara de alta resolución que toma precisas fotos de rocas y sólidos para su posterior análisis. Este comprueba el tamaño y la forma de los granos de las rocas sedimentarias, importantes para identificar la posible existencia de agua en el pasado.

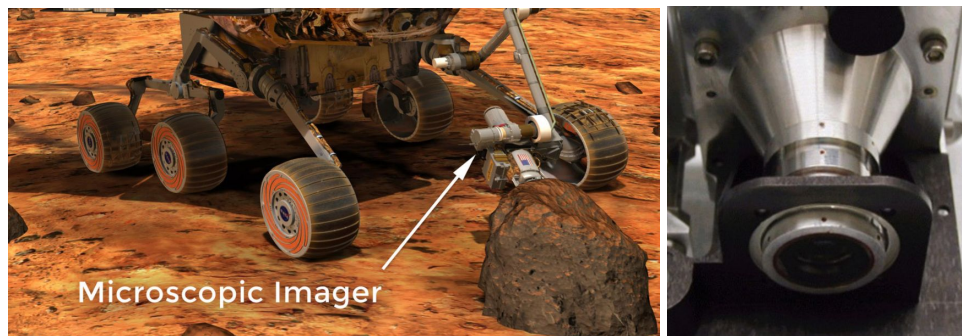


Figura 4 - Microscopic Imager

- Hazard Avoidance Cameras (Hazcams): Cámaras en blanco y negro capturan imágenes tridimensionales (3D), protegiendo contra la posibilidad del rover de perderse o chocarse contra obstáculos inesperados. Funciona a la par con el software, permitiéndole tomar sus propias decisiones por su seguridad, otorgándole mayor autonomía.

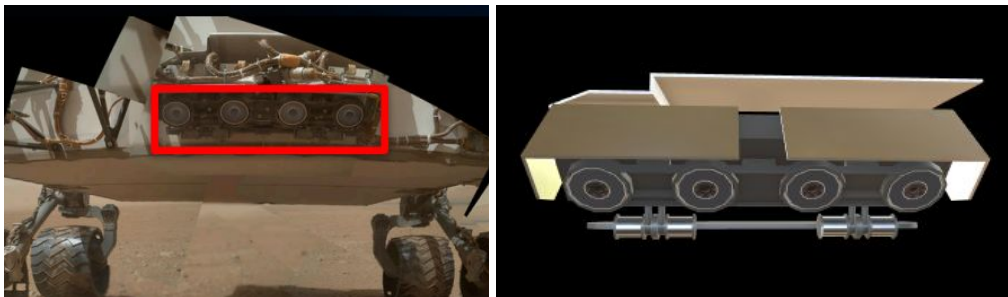


Figura 5 - Hazard Avoidance Cameras

- Miniature Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES): Toma medidas en el espectro infrarrojo de luz o calor que emiten distintos minerales y rocas. Especialmente útil para observar minerales formados en agua.

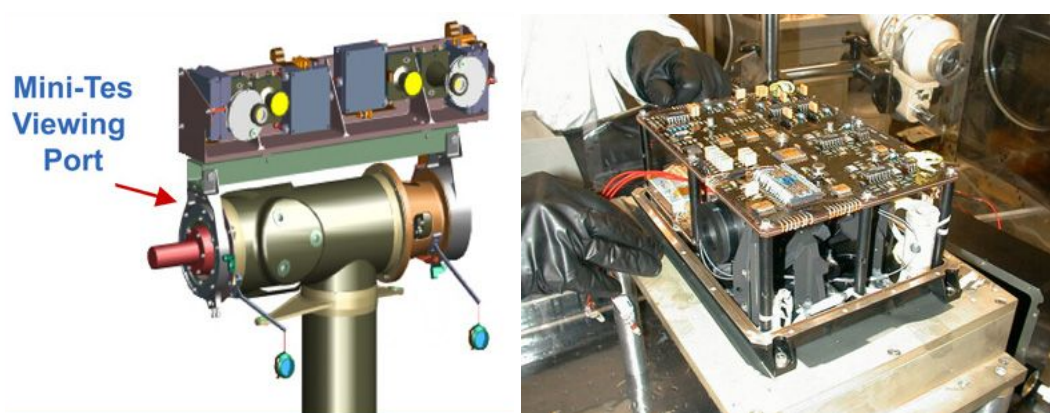


Figura 6 - Miniature Thermal Emission Spectrometer

- Mössbauer spectrometer (MB): Determina la cantidad de hierro que contienen los minerales, también examina muestras de polvo magnético recogido en la cubierta del rover (por el Magnetic Array).

- Magnetic Array: Recolecta granos de polvo para el análisis sobre su composición y las pistas sobre la historia de las partículas.

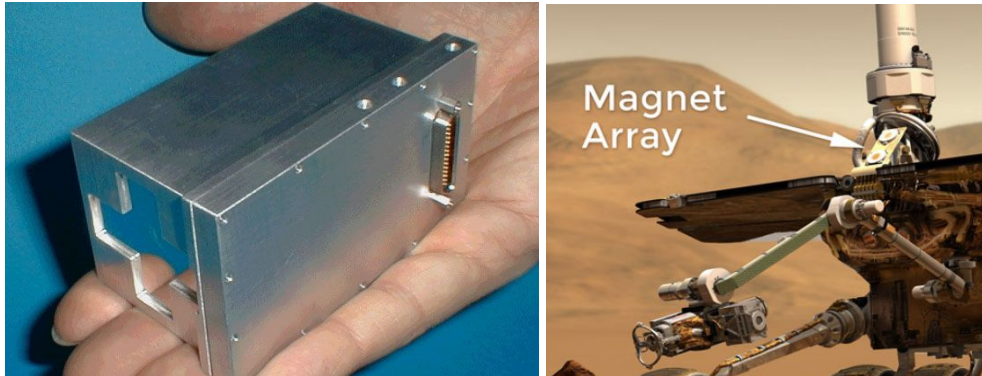


Figura 7 - Espectrómetro de Mössbauer (izquierda) y Magnetic Array (derecha)

- Alpha Particle X-Ray Spectrometer (APXS): Espectrómetro que revela la química de las rocas midiendo su reacción ante radiación mediante rayos X y partículas alfa.

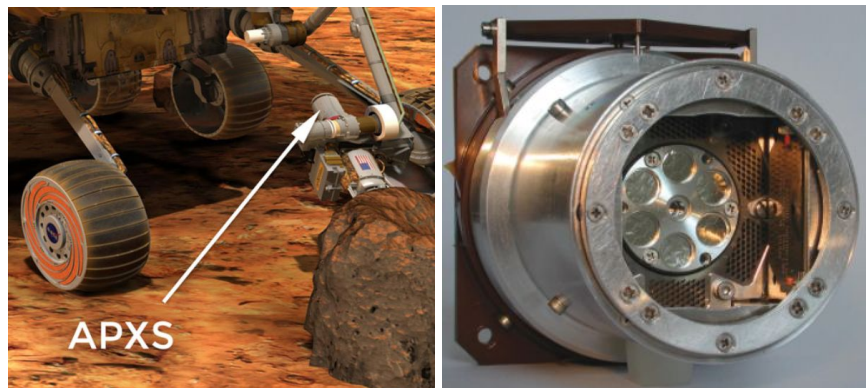


Figura 8 - Alpha Particle X-Ray Spectrometer

- Calibration targets: Incluye un sundial para determinar los colores y el brillo de la información recopilada por los instrumentos.



Figura 9 - Calibration targets

3.3.2 - Curiosity

El robot Curiosity cuenta con tres cámaras principales, cuatro espectrómetros, dos detectores de radiación, un sensor ambiental y un sensor atmosférico [12].

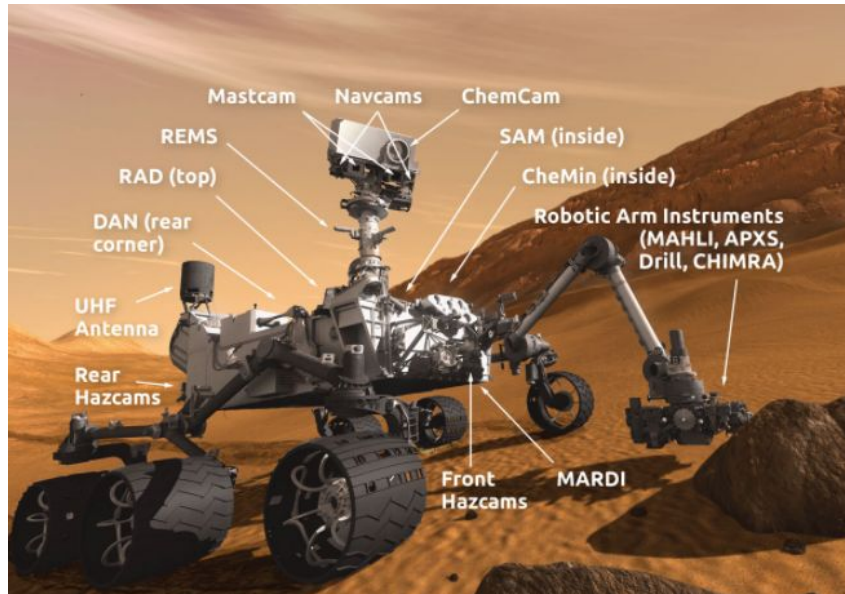


Figura 10 - Disposición sensores Mars Curiosity Rover

- Mast Camera (Mastcam): Toma imágenes a color y vídeos de la superficie Marciana. Las imágenes se pueden unir para formar una panorámica alrededor del rover. Se utiliza para apoyar las operaciones de conducción del rover, además de para estudiar el paisaje y ver fenómenos meteorológicos.



Figura 11 - Mast Camera

Una de las capacidades de la Mastcam es su resolución mediante la variación de la longitud focal de ambas cámaras (34mm y 100mm), logrando así tomar fotos a 100 metros de distancia con una buena resolución (tras su transformación). La figura 12 muestra un ejemplo de un afloramiento rocoso al sur de Utah [13].

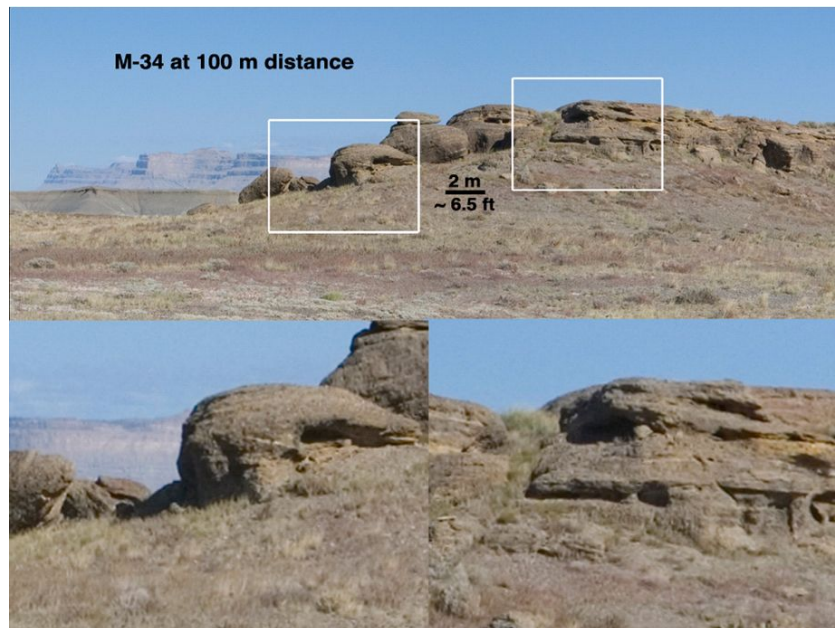


Figura 12 - Imagen tomada por la Mastcam del Curiosity

- Hazard Avoidance Cameras (Hazcams): Ya utilizado en el Opportunity. En la figura 13 se puede observar la imagen tomada por una Hazcam frontal a máxima resolución tras remover la distorsión causada por las lentes.



Figura 13- Imagen tomada por la Hazcam frontal del Curiosity

- Mars Hand Lens Imager (MAHLI): Se trata de una lente que revela los minerales y texturas de las rocas superficiales. Capaz de tomar imágenes a color del tamaño de 12.5 micrómetros. MAHLI tiene fuentes de luz blanca y ultravioleta, capaz de detectar minerales de carbonato y evaporita.

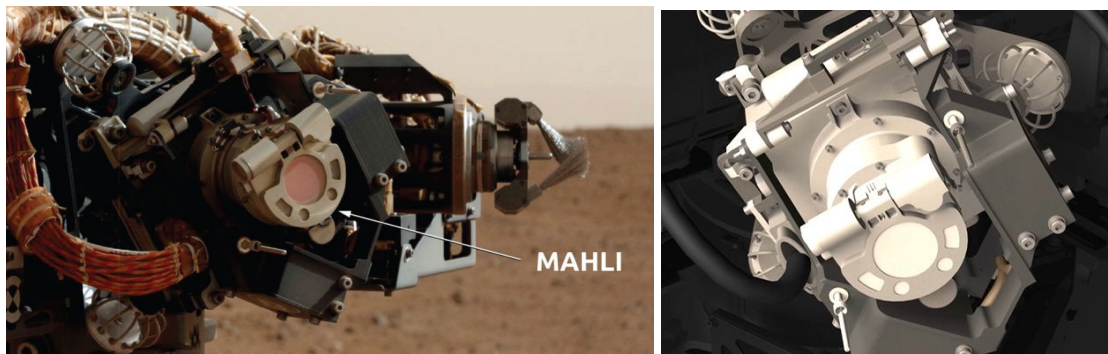


Figura 14 - Mars Hand Lens Imager

- Mars Descent Imager (MARDI): Graba un video a color del terreno inferior al rover mientras desciende por la superficie. Muy útil para reconocer la ubicación de escombros y acantilados a la hora de explorar el terreno y para determinar la ubicación precisa de la nave tras su aterrizaje.

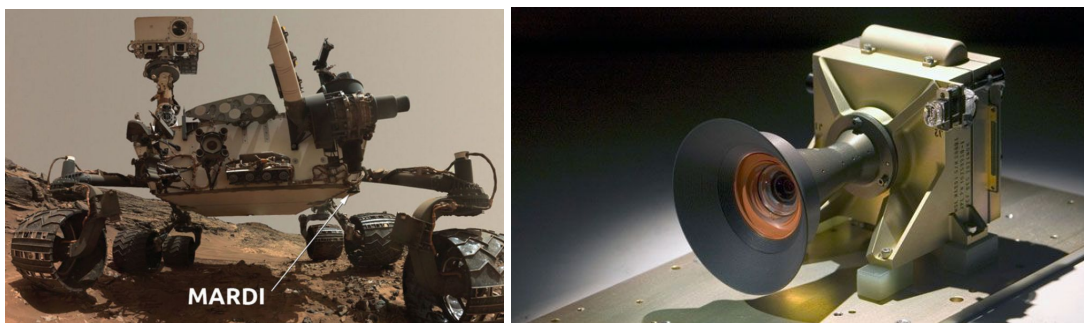


Figura 15 - Mars Descent Imager

- Alpha Particle X-Ray Spectrometer (APXS): Ya mencionado su uso en el Opportunity
- Chemistry and Camera (ChemCam): Envía un láser que analiza la composición elemental de los materiales evaporados menores de 1mm. Permite diferenciar el tipo de roca (ígneas, metamórficas o sedimentarias) a analizar o medir la profundidad de estas. Además, reconoce hielo y minerales con moléculas de agua en sus estructuras cristalinas.

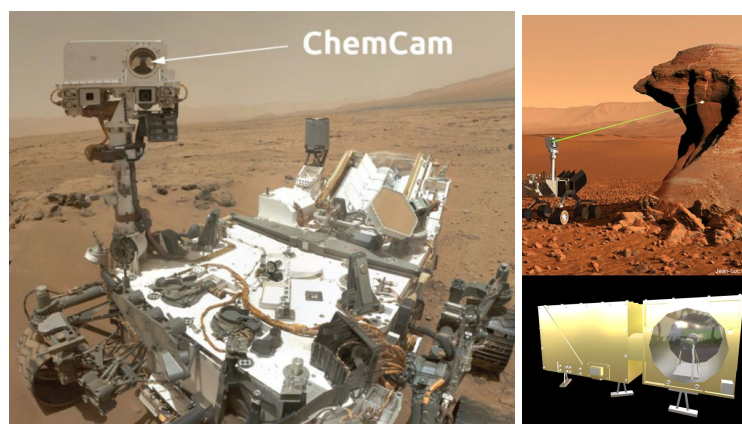


Figura 16 - Chemistry and Camera

- Chemical and mineralogy (CheMin): Realiza un análisis químico de muestras de polvo de roca para identificar los distintos materiales de los que se compone. Utilizado para seguir estudiando el papel que desempeña el agua en la formación de minerales, pudiendo encontrar pistas sobre un entorno marciano que podría haber sustentado vida.

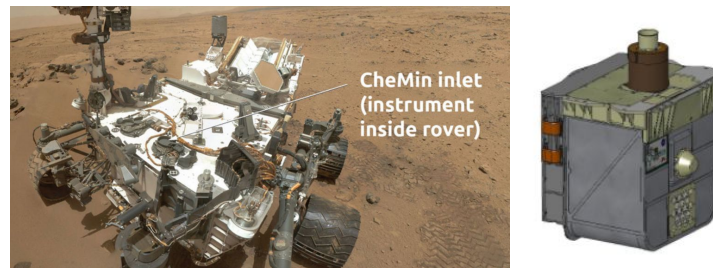


Figura 17 - Chemical and mineralogy

- Sample Analysis at Mars (SAM): Conjunto de un espectrómetro de masas, un cromatógrafo de gases y un espectrómetro láser sintonizable. Busca y mide la abundancia de elementos ligeros como el hidrógeno, oxígeno o nitrógeno (asociados con la vida). A continuación la explicación de los tres instrumentos:
 - Espectrómetro de masas: Detecta elementos clave para la vida (oxígeno, carbono, nitrógeno y fósforo).
 - Cromatógrafo de gases: Separa los gases para identificarlos.
 - Espectrómetro láser sintonizable: Detecta vapor de agua y determina el origen de procedencia del metano (proceso biológico o geológico).

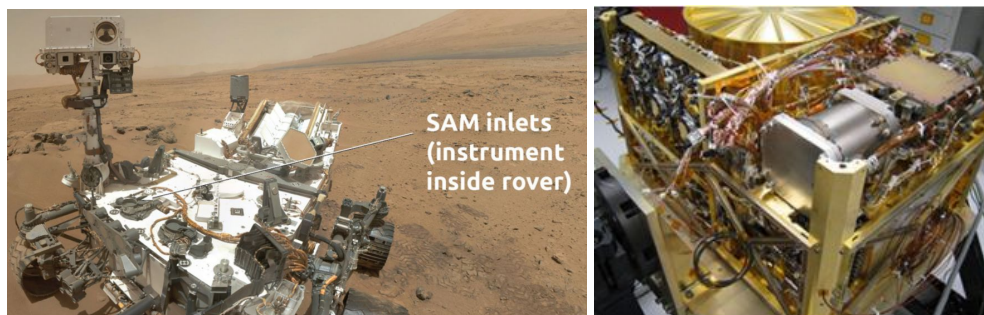


Figura 18 - Sample Analysis at Mars

- Radiation Assessment Detector (RAD): Mide la radiación de alta energía en la superficie, como protones, neutrones o rayos gamma. Incluyendo tanto la radiación solar y espacial como la atmosférica. Evalúa el peligro para la exploración humana en un futuro y para la vida microbiana potencial (en el pasado y en el presente).

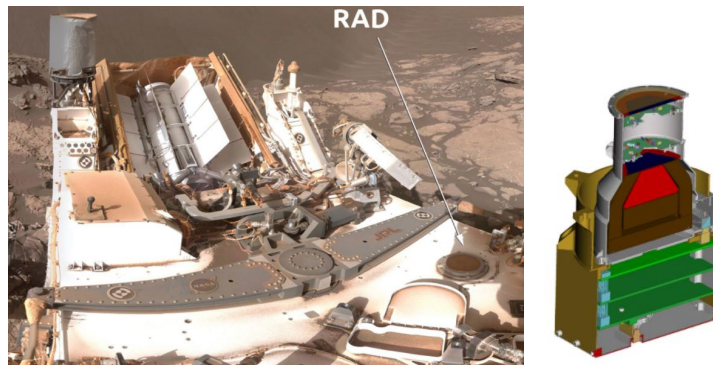


Figura 19 - Radiation Assessment Detector

- **Dynamic Albedo of Neutrons (DAN):** Mide la velocidad de reflexión de los neutrones que escapan al espacio, ya que tienen menos energía cuando son reflejados por el hidrógeno del agua y se mueven más lentamente. Sabiendo que el albedo es el porcentaje de radiación que refleja cualquier superficie.

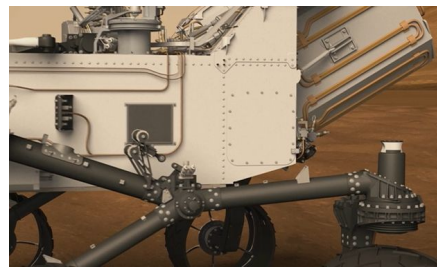


Figura 20 - Dynamic Albedo of Neutrons

- **Rover Environmental Monitoring Station (REMS):** Mide la temperatura, presión atmosférica, humedad y radiación ultravioleta en la superficie marciana.
- **Mars Science Laboratory Entry Descent and Landing Instrument (MEDLI):** Se trata de un instrumento de aterrizaje, no incorporado en el Curiosity. Recopila datos de temperatura y presión de la nave espacial al entrar en la atmósfera marciana. Cuenta con el MEDLI Integrated Sensor Plugs (MISP) para la temperatura y el Mars Entry Atmospheric Data System (MEADS) para la presión atmosférica. Estos se utilizaron en la entrada y descenso a través de la atmósfera de Marte.

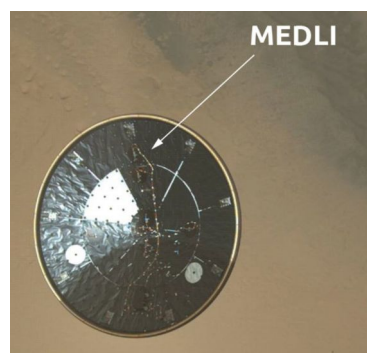


Figura 21 - MEDLI

3.3.3 - Mars 2020 (Perseverance)

El Mars 2020 dispone de 23 cámaras, 7 de ellas referentes a las de descenso y aterrizaje, 9 son cámaras de ingeniería y 7 cámaras científicas [14].

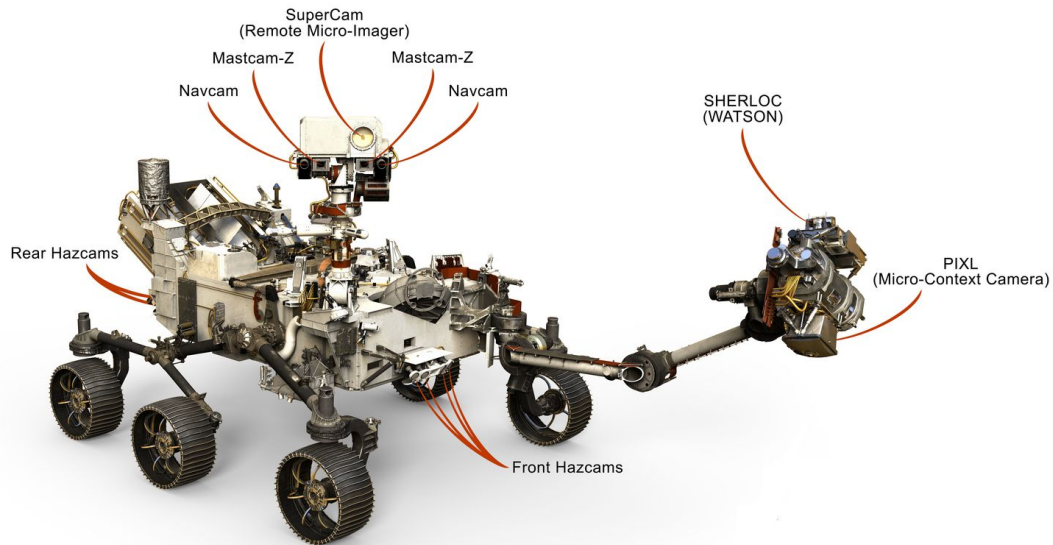


Figura 22 - Disposición cámaras Mars 2020 Rover, Perseverance

Respecto a las de aterrizaje, se refieren a varias cámaras y un micrófono:

- Parachute “up look” camera: Montadas en la parte trasera, apuntando hacia arriba para ver el despliegue del paracaídas.
- Descent “down look” camera: Mira hacia abajo mientras se baja en la maniobra de la grúa aérea.
- Rover “up look” camera: Montado en la cubierta del rover, mira hacia arriba en la etapa de descenso y la separación de descenso.
- Rover “down look” camera: Montada debajo del rover, mira hacia abajo durante el aterrizaje.
- Micrófono de grabación de aterrizaje: Graba los sonidos del descenso, como la fricción de la atmósfera y el polvo que se desplaza al aterrizar el rover.

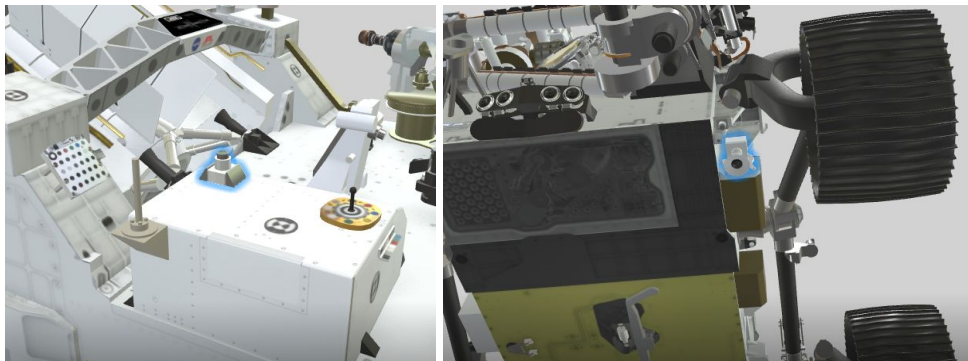




Figura 23 - Cámaras up look, down look y micrófono de aterrizaje

Las cámaras de ingeniería son:

- Hazard Avoidance Cameras (Hazcams): Seis cámaras de detección de peligros (4 en la parte delantera y 2 en la trasera). Similares a las utilizadas en los anteriores rovers, siendo capaces de detectar rocas grandes, dunas de arena y saber dónde mover el brazo robótico.

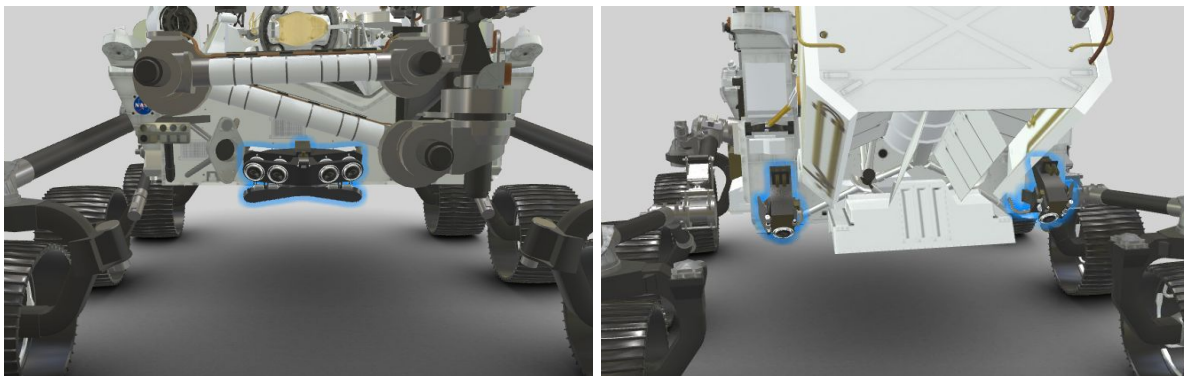


Figura 24 - Hazcams frontales (izquierda) y traseros (derecha) del Perseverance

- Navigation Cameras (Navcams): Cámara de navegación estéreo de dos colores. Se trata de la información principal utilizada por el Perseverance para navegar de forma autónoma (sin contar con la odometría de las propias ruedas). Se encuentra en el Mastcam, junto con dos cámaras de ciencia donde le otorgan al rover una “perspectiva humanoide” del entorno.
- CacheCam: Cámara encargada de tomar imágenes de las muestras que se recogen, para “vigilarlas” a medida que se obtienen y así mantienen un registro de las muestras recogidas.

Las cámaras de ciencia son:

- Mastcam-Z: Se trata de un sistema de cámara equipado con una función de zoom, que le permite enfocar y tomar imágenes y vídeos 3D a gran velocidad para examinar objetos a gran distancia. Muestra la escena alrededor del rover (360°).

- Supercam: Examina rocas y el suelo mediante una cámara, un láser y un espectrómetro para encontrar compuestos orgánicos relacionados con la vida en Marte. También cuenta con un micrófono para sumar un “sentido” más a la examinación de la supercam.
- PIXL: Identifica elementos químicos a pequeña escala y toma fotografías en primer plano de texturas de rocas y suelos. Esta información ayuda a buscar signos de vida microbiana. También se utiliza para revisar el estado del propio Perseverance desde “fuera”.



Figura 25 - PIXL

- SHERLOC: Escáner de entornos habitables para productos orgánicos y químicos. Utiliza espectrómetros, un láser y una cámara, buscando minerales que han sido alterados por ambientes acuosos.

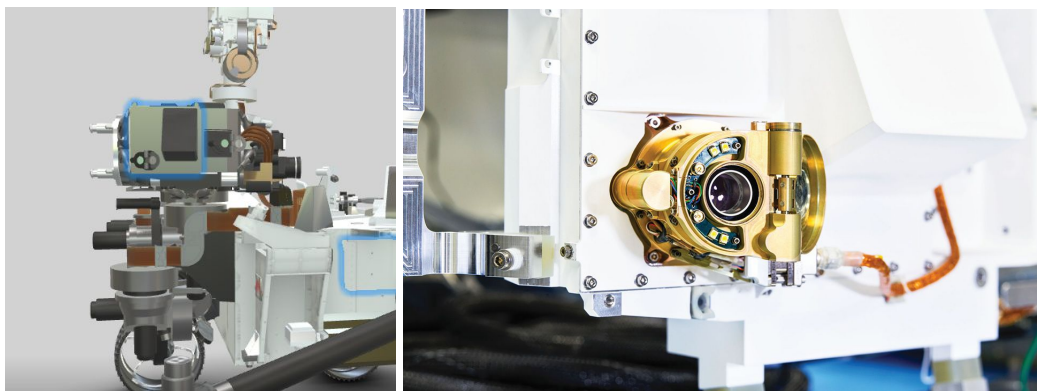


Figura 26 - SHERLOC

- WATSON: Similar a la cámara MAHLI del Curiosity. Este complementa a SHERLOC tomando fotografías del entorno del objetivo de SHERLOC, para darle información general a la escaneada con detalle.

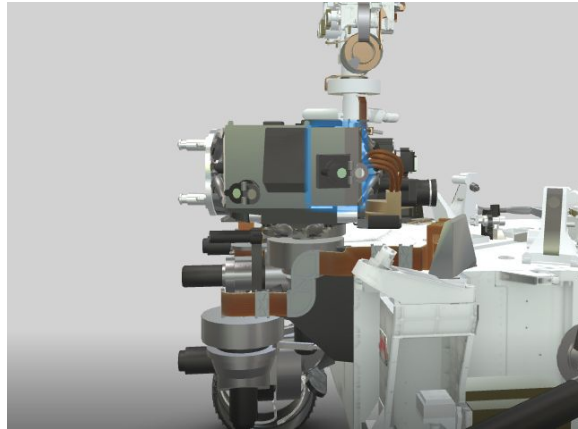


Figura 27 - WATSON

3.4 - Sistema de movimiento

Los rover son robots que basan su movimiento en ruedas. Las diferencias entre unos y otros son relativamente pequeñas basándose en mejoras sobre los modelos anteriores.

3.4.1 - Opportunity

El Opportunity [15] cuenta con seis ruedas con un motor independiente para cada una de ellas.

Las ruedas tienen 26 cm de diámetro, siendo más grandes que sus predecesores. Tienen un patrón en espiral que previene que el movimiento de las ruedas pase a otras partes del robot absorbiendo los diferentes movimientos.



Figura 28 - Rueda con patrón en espiral y espuma Solimide

Las zonas naranjas entre los radios de las ruedas son una espuma especial llamada Solimide [16]. Se utiliza para que las rocas o polvo que pueda haber en la superficie no se introduzcan entre los radios de la rueda causando problemas en los actuadores. La espuma además mantiene su flexibilidad aún sometida a las bajas temperaturas de Marte.

3.4.2 - Curiosity y Mars 2020 (Perseverance)

En los últimos modelos de estos robots, todos cuentan con seis ruedas, cada una con su propio motor incorporado. Las dos ruedas delanteras y las dos traseras son las ruedas motrices, dejando las del centro como pasivas. Este sistema se construye de esta manera para que el robot pueda rotar completamente sobre sí mismo sin desplazarse.

Las ruedas, diferentes de las que estamos acostumbrados a ver, están hechas de aluminio a los que se le incorpora tacos para mejorar la adhesión y radios curvos.



Figura 29 - Ruedas de los robots Curiosity y Perseverance

El diámetro de cada rueda es de unos 50 cm para ambos modelos de los robots [17][18].

Como curiosidad se puede observar que el modelo Curiosity lleva impreso en sus neumáticos las siglas JPL (Jet Propulsion Laboratory), el laboratorio que lo construyó, en código Morse [18].

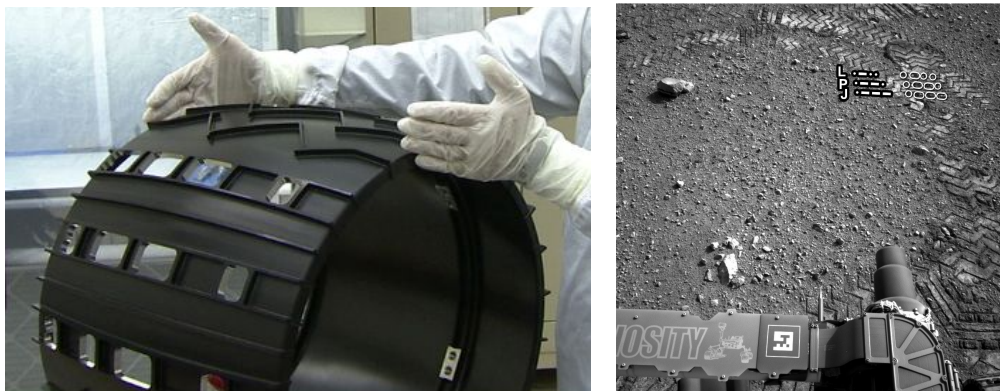


Figura 30 - Impresión en Morse de las siglas JPL

3.4.3 - Sistema de suspensión

Además existen tres tipos de suspensión que unen las ruedas entre sí para facilitar ciertos movimientos. Este sistema es común en los tres modelos de Rovers que se analizan.

Por un lado tenemos el tipo “differential”, que conecta la suspensión “rocker” del lado derecho e izquierdo desde la parte superior del robot.

La antes mencionada “rocker”, también a cada lado del rover conecta las ruedas de delante con la diferencial y la “bogie” en la parte trasera.

Y por último la “bogie” que conecta la rueda del medio y la trasera a la suspensión rocker. Se puede observar el montaje de la suspensión en la siguiente imagen.

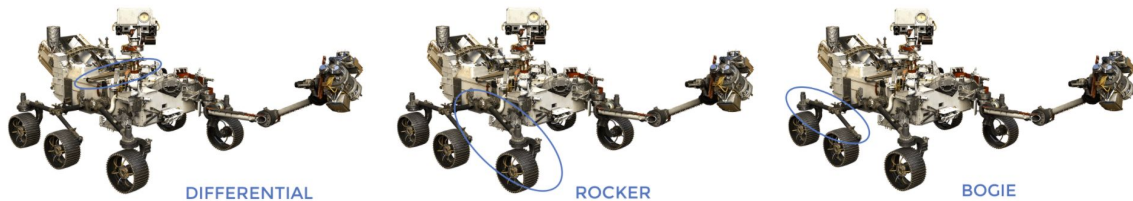


Figura 31 - Diferentes suspensiones de los robots

Con estas suspensiones los rover pueden desplazarse por el terreno desnivelado de Marte manteniendo un peso repartido en cada una de las ruedas. Puede superar obstáculos como piedras o depresiones hasta el tamaño de sus ruedas y atravesar zonas de arena y rocas.

3.4.4 - Velocidad

Los robots pueden llegar a una velocidad de 4 cm/s viajando en terreno llano lo que se traduce en unos 152 m en una hora. Esta velocidad es adecuada para el movimiento en Marte y es una manera de ahorrar energía llegando a consumir menos de 200 W de potencia.

4 - Software

4.1 - Estimación de la posición y orientación

Los rover estiman su posición relativa en un mapa local a partir del movimiento. Esto se obtiene combinando la odometría de las ruedas, es decir, lo lejos que cada rueda ha viajado, una unidad de medida inercial (IMU) que nos da información sobre la aceleración lineal y la velocidad angular y una estimación visual basada en el terreno. Normalmente el uso de las dos primeras es suficiente para moverse por terreno duro o blando. Sin embargo, se usa la cámara en caso de que el robot deslice.

La estimación visual de la posición[19] detecta y rastrea automáticamente características científicas a partir de las imágenes proporcionadas por la cámara. Aquí se puede ver como el seguimiento de características ocurre entre cada par de imágenes. Estas han sido superpuestas para una mayor comprensión.

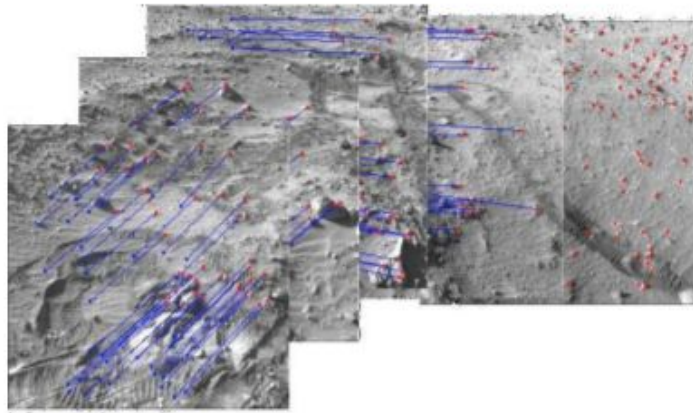


Figura 31 - Seguimiento de características

Luego, mediante el movimiento 3D de estas características se actualiza la posición estimada. Esto permite acelerar la conducción en terrenos difíciles y mejora la seguridad al realizar controles de deslizamiento. La primera imagen muestra un gráfico con los errores de las diferentes odometrías y se puede apreciar como las ruedas han calculado que han avanzado mucho pero en realidad apenas se ha movido debido a que estaban resbalando. En la segunda imagen, el camino azul muestra el camino percibidos por la odometría con las ruedas y el camino real corregido por la odometría visual.

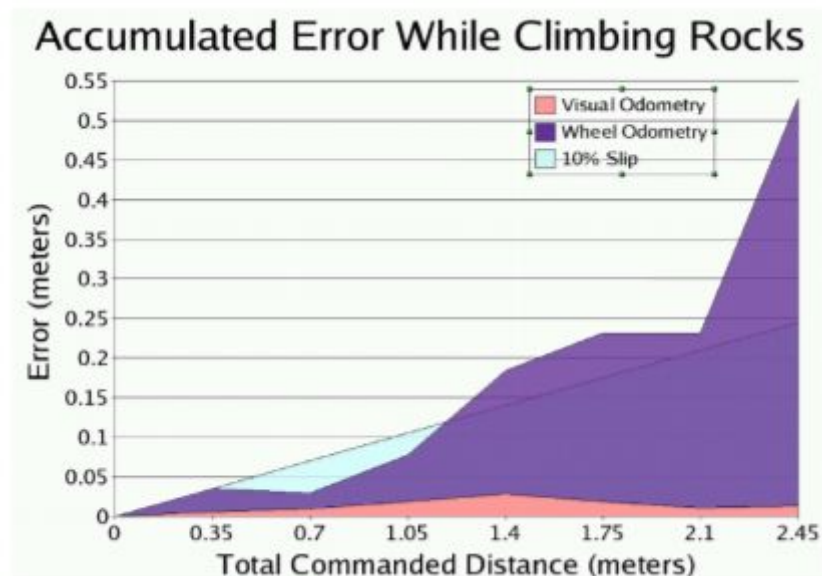


Figura 32 - Gráfica de errores de odometría

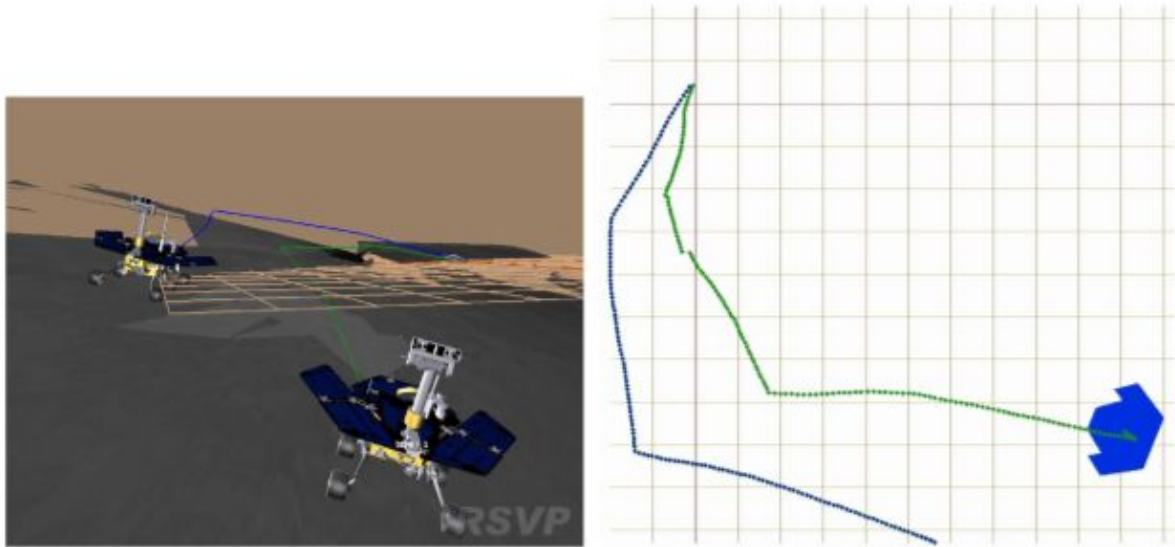


Figura 33 - Trayectoria de rover

Todo esto suena muy bien pero conlleva un gran coste computacional. Por eso mismo solo se usa cuando es necesario.

Para la orientación, el rover detecta la posición del sol y luego usa esta información en conjunto con el horario solar y la IMU para computarla.

4.2 - Navegación

Los ingenieros mejoraron el software de navegación automática del rover Sojourner para dar más libertad a los siguientes modelos[20].

Cuando los vehículos exploradores navegan por sí mismos, reciben un comando que les indica dónde terminar y luego evalúan el terreno con imágenes estéreo para elegir la mejor manera de llegar allí evitando cualquier obstáculo identificado. Esta capacidad ha permitido viajes diarios más largos de lo que hubiera sido posible simplemente dependiendo de los comandos de navegación paso a paso de la Tierra.

El sistema de navegación automática toma fotografías del terreno cercano utilizando uno de los pares de cámaras estéreo (que se encuentran montadas en el cuerpo en el Spirit y en el mástil en el Opportunity). Una vez que se toman las imágenes estéreo, el software del rover genera automáticamente mapas del terreno en 3D. La transitabilidad y la seguridad se determinan a partir de la altura y densidad de las rocas o escalones, las inclinaciones excesivas y la rugosidad del terreno.

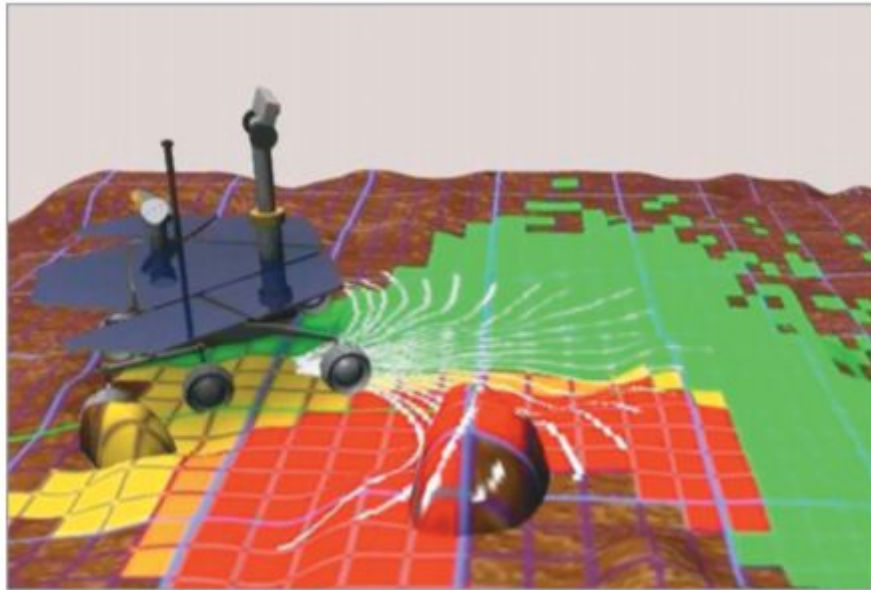


Figura 34 - Mapa y posibles caminos

El sistema de seguridad a bordo de Sojourner también buscaba obstáculos, pero solo podía medir 20 características o keypoints en cada paso mientras que Spirit y Opportunity suelen medir más de 16.000 puntos por cada par de imágenes.

Tras obtener los keypoints el algoritmo considera decenas de caminos posibles antes de elegir el camino más corto y seguro hacia el objetivo geográfico programado. Finalmente, el vehículo se desplaza entre 0,5 y 2 metros de su trayectoria, dependiendo de cuántos obstáculos haya cerca. Todo el proceso se repite hasta que alcanza su objetivo o se le ordena que se detenga.

4.3 - Investigación de un objetivo

Una de las metas era usar instrumentos científicos montados en el brazo robótico del rover para investigar y analizar el terreno de Marte. Esto requería que fuera a un objetivo designado, se posicionara para alcanzarlo y desplegara el brazo para empezar la investigación. Esto era un proceso bastante manual porque requería de confirmación humana en cada paso para asegurar la seguridad del rover, del brazo y de los instrumentos. A continuación, se añadieron capacidades automáticas al sistema para reducir el número de solicitudes para alcanzar e inspeccionar un objetivo. Esto incluye las habilidades de seguir al objetivo cuando se acerca a él, la mejor configuración para posicionarse, desplegar el brazo e inspeccionar el objetivo de forma segura y usar imágenes para corregir los errores de posicionamiento del brazo.

4.3.1 - Seguimiento del objetivo

Los rovers tienen unas cámaras orientables en un mástil que le permiten seguir un objetivo[21] cuando se aproxima a él. Esto permite que el robot vaya a un objetivo designado con un control de lazo cerrado en lugar de simplemente conducir hasta un punto de ruta específico, que podría no ser posible debido a un deslizamiento.

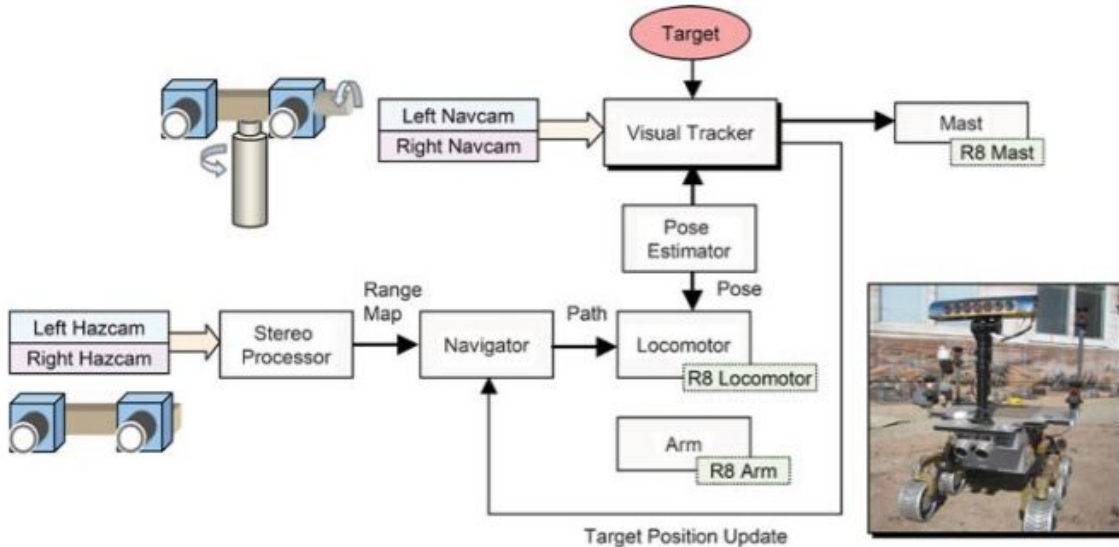


Figura 35 - Diagrama para el seguimiento

Es importante saber que si por lo que sea el robot no puede aproximarse al objetivo desde el ángulo que está viendo, se intentará llegar desde otro. Por eso se necesita una compensación entre la rotación de imágenes. En la siguiente imagen se puede apreciar un giro de 30° entre imágenes. Sin esta compensación es posible que el movimiento no hubiera tenido éxito.



Figura 36 - Compensación de la cámara

Diferente a la odometría visual que sigue docenas de cientos de características automáticamente, se centra en un único objetivo y, como consecuencia, se puede ejecutar mucho más rápido.

4.3.2 - Posicionamiento

Cuando el rover alcanza la vecindad del punto objetivo, debe colocarse[22] para que el brazo pueda alcanzar el objetivo y colocar la herramienta. Esto requiere tener en cuenta el terreno frente al objetivo así como la geometría de la superficie del objetivo. Usando un modelo del terreno y del objetivo construido a partir de las cámaras estéreo, el robot puede automáticamente determinar la posición óptima buscando en todas las posibles posiciones para maximizar la manipulabilidad del objetivo. El algoritmo itera a lo largo del vector de aproximación para calcular una nueva posición. El rover se mueve a esta posición y el proceso se repite hasta que un criterio de convergencia se consigue.

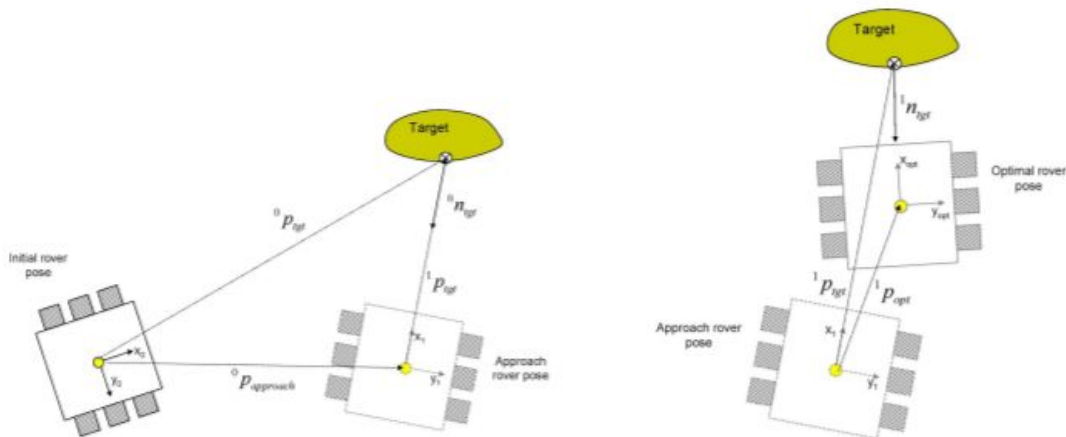


Figura 37 - Posicionamiento del rover

4.3.3 - Despliegue del brazo

El rover utiliza el modelo del terreno y del robot para predecir colisiones durante el despliegue del brazo[23]. También puede corregir el error de posicionamiento del brazo usando coordinación ojo-mano. Puede usar las cámaras estéreo para detectar un marcador al final del brazo, calcular visualmente la posición del brazo offline que podría no haberse conseguido por culpa de la gravedad o a un error en el control de posición y corregir la posición final. A continuación, se puede ver un modelo del terreno y del robot para el cálculo de colisiones (izquierda) y el uso de cámaras para la corrección de la posición (derecha).

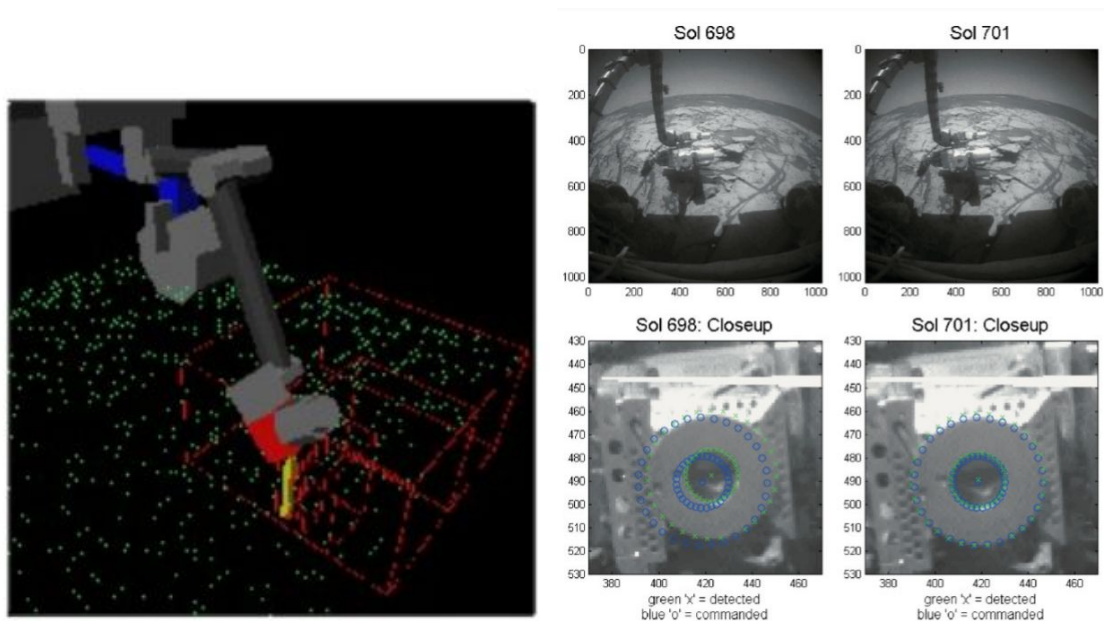


Figura 38 - Mapa de colisiones y corrección de errores de posición

4.4 - Detección de eventos científicos

El rover ha adquirido la habilidad de etiquetar observaciones científicas[24] puntuales a partir de las imágenes. Esto permite detectar eventos científicos raros o interesantes como remolinos de arena o formaciones de nubes y enviar estas observaciones de vuelta a la Tierra.

El software puede detectar remolinos de arena procesando y comparando imágenes tomadas en un corto periodo de tiempo (izquierda). Para detectar la presencia de nubes, se localiza el horizonte y buscan regiones de varianza de alta intensidad en el cielo (derecha).

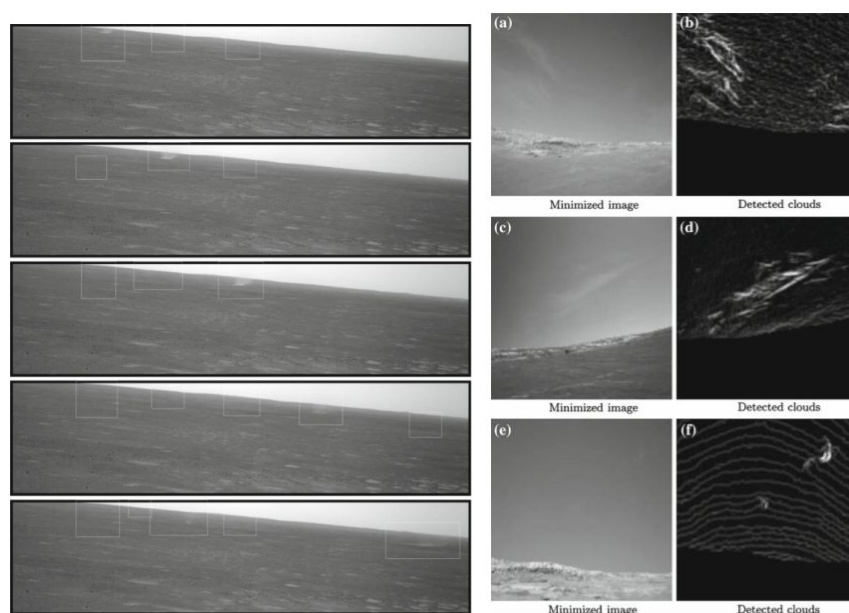


Figura 39 - Detección de remolinos de arena y nubes

4.5 - Predicción del terreno

Navegar por terrenos duros o muy deslizantes involucra interacciones con un alto nivel de complejidad entre el vehículo y el terreno. Por ejemplo, la forma en la que el robot se mueve en una pendiente de arena y el tipo de arena afecta en cuánto y en qué dirección el robot puede deslizarse o en cuánto se puede hundir. Una forma de encargarse de este problema es dotar al robot con la capacidad de automáticamente aprender propiedades del terreno[25] mientras está moviéndose por encima y luego usar este conocimiento para predecir y reaccionar a terreno nuevo. Puede aprender propiedades del terreno sintiendo la cantidad y dirección de deslizamientos y correlacionándolas con la apariencia y geometría del terreno. Este enfoque autosupervisado permite predecir el deslizamiento de un nuevo terreno sin haberlo pisado previamente. Combinando conocimientos de las propiedades del terreno con un modelo preciso del robot, se puede predecir cómo reacciona sobre dicho terreno y elegir el mejor camino para navegar.

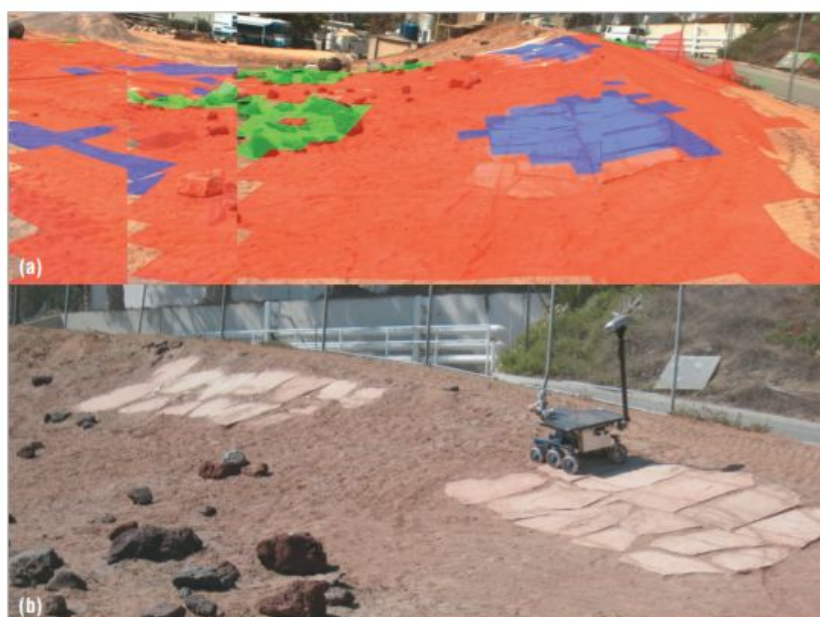


Figura 40 - Predicción del terreno

4.6 - Comunicación con la Tierra

La Red de Espacio Profundo de la NASA (DSN) es una red internacional de antenas que proporciona los enlaces de comunicación entre los científicos e ingenieros en la Tierra para las misiones en el espacio y en Marte[26].

El DSN consta de tres instalaciones de comunicaciones del espacio profundo ubicadas aproximadamente a 120 grados de distancia en todo el mundo: en Goldstone, en el desierto de Mojave de California; cerca de Madrid, España; y cerca de Canberra, Australia. Esta ubicación estratégica permite la observación constante de las naves espaciales mientras la Tierra gira sobre su propio eje.

El rover no solo envía mensajes directamente a las estaciones DSN, sino que también puede transmitir información a otras naves espaciales que orbitan alrededor de Marte, utilizando principalmente la sonda Mars Reconnaissance Orbiter como mensajero que transmite noticias a la Tierra. Los orbitadores pueden ver la Tierra aproximadamente 2/3 de cada órbita, o aproximadamente 16 horas al día y pueden enviar muchos más datos directamente a la Tierra que el rover, no solo porque pueden ver la Tierra por más tiempo, sino también porque tienen mucha potencia y antenas más grandes que el rover. Para entenderlo mejor existe este video explicativo de la NASA:



Figura 41 - Video explicativo: <https://www.youtube.com/watch?v=2t7p08hcQzs>

5 - Los siete minutos del terror

Como curiosidad, para que el rover pueda ser desplegado en la superficie marciana, se han de superar los llamados “siete minutos del terror”[27], a los que se han enfrentado todas las naves que han intentado posarse sobre el planeta. Según informa la NASA, la sonda entra en la atmósfera marciana a toda velocidad y tiene alrededor de 7 minutos para frenar antes de tocar tierra.

Alcanza una velocidad máxima de 17.300 kilómetros por hora, por encima de la del sonido; el roce con la atmósfera calienta su escudo térmico hasta los 1.500 grados. A tan solo tres minutos de tocar tierra, despliega un paracaídas que la hace frenar hasta los 1.370 kilómetros por hora.

En el último tramo del descenso, cuando le queden alrededor de 800 metros y menos de un minuto, soltará el paracaídas y deberá valerse de sus retrocohetes para frenar hasta sólo 8 kilómetros por hora, la velocidad segura para el aterrizaje. A continuación se proporciona el vídeo explicativo del aterrizaje del Curiosity.

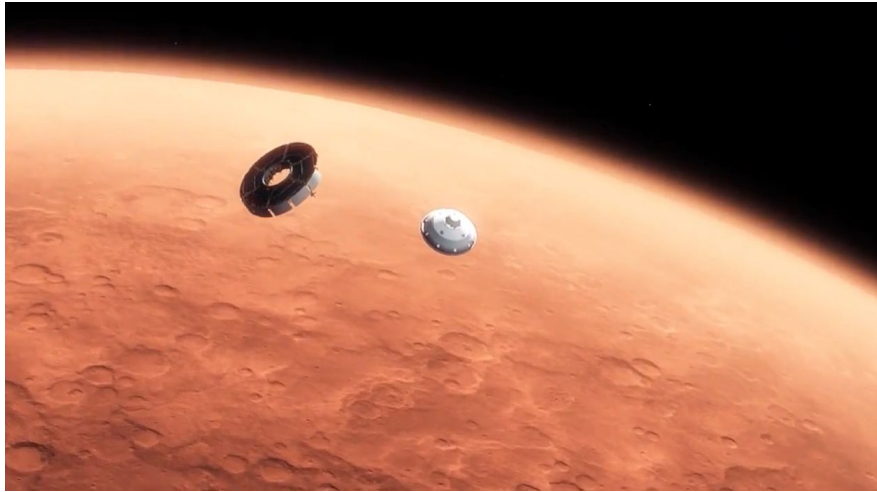


Figura 42 - Video explicativo: https://www.youtube.com/watch?v=4Cqet_WpQsQ

6 - Ingeniería inversa

Debido a la competencia en la llamada "carrera espacial" es imposible obtener los algoritmos exactos del funcionamiento del software de los rovers por parte de la NASA. Es por eso que en este proyecto se ha realizado una búsqueda sobre documentos y proyectos que tratan de emular su funcionamiento.

En concreto, se explicará un proyecto de construcción de un MARS[25] realizado por la universidad de West Virginia (Estados Unidos) para un concurso de la NASA donde se puede ver el desarrollo de software.

6.1 - RCU

El software RCU (Robot Control Unit) es responsable del control del motor, el control de múltiples cámaras y la adquisición de imágenes, transmitir telemetría a la OCU, realizar cálculos NAS(Navigation Assistance System) y aceptar comandos de la OCU. El software emplea varios subprocesos para proporcionar un rendimiento óptimo e interacción entre cada componente de software.

El uso de hilos separados para manejar la operación de cada componente individual permite que todos los componentes, que pueden operar en diferentes frecuencias de actualización, funcionen armoniosamente. La división del trabajo entre estas clases e hilos aísla cada componente de los demás, asegurando que el fallo de uno solo no afecte negativamente al resto del sistema.

Los mecanismos de seguridad se implementan con temporizadores de vigilancia en la capa del controlador del dispositivo. Esta proporciona a cada controlador su propia política de tiempo de espera y procedimientos de aplicación, y aísla la tarea de

el sistema de comunicaciones. La OCU y la RCU mantienen una señal de latido entre ellas para que la RCU no continúe operando bajo pérdida de la OCU.

La telemetría móvil incluye datos filtrados y fusionados de GPS / IMU, datos de brújula digital que incluyen niveles de tono, rumbo y voltaje de la batería. Todas las clases de software de telemetría implementan una interfaz titulada IProvideTelemetry. Esta interfaz especifica el contrato al que deben adherirse las clases de telemetría para que se puedan integrar fácilmente en el software RCU. Este mecanismo orientado a objetos se utiliza para que cualquiera de los sensores futuros puedan simplemente implementarse en la interfaz IProvideTelemetry y luego agregarse a la RCU software.

La RCU empaqueta toda la telemetría en un solo paquete que se serializa y transmite a través de UDP a la OCU para especificar la frecuencia con la que desean que se proporcionen datos de telemetría.

Las imágenes de la cámara web y la cámara Axis se adquieren integrando la biblioteca AForge.

AForge es un conjunto de bibliotecas de código abierto para incorporar técnicas robóticas como computadoras visión, inteligencia artificial y procesamiento de imágenes en software robótico. Esta biblioteca proporciona una interfaz simple para capturar fotogramas individuales de las fuentes de video. Para minimizar el uso de ancho de banda, los fotogramas capturados por las cámaras se comprimen y transmiten en formato JPEG. El nivel de compresión y la velocidad de fotogramas se pueden variar dinámicamente para proporcionar el mejor equilibrio para la tarea actual.

6.2 - Unidad de control de operador OCU

El software de la unidad de control del operador tiene dos tareas principales: procesar la entrada del usuario para controlar el estado del rover y mostrar la información de telemetría. La unidad de control está diseñada para dos operadores: el operador móvil y el operador del sistema de adquisición de muestras. El software proporciona a cada operador su propia interfaz gráfica de usuario (GUI), lo que les permite trabajar en conjunto para lograr los objetivos de la misión.

El operador móvil puede controlar el móvil con un mando de Xbox 360, ajustar los parámetros de red (Punto final de IP, velocidad de comunicación), ajuste la configuración del controlador (sensibilidad del joystick), y también seleccionar tipos individuales de telemetría (alimentación de video, información de posición, voltajes de la batería) para mostrar a su preferencia.

El operador de adquisición de muestras puede operar el brazo robótico y el telémetro láser, configurar trayectorias para muestrear ubicaciones y ajustar la sensibilidad del joystick. Una característica clave del software es la capacidad de variar la calidad y la frecuencia de actualización del video desde cada cámara.

Dado el ancho de banda restringido, equilibrar la calidad de las imágenes versus la frecuencia de transmisión será un elemento de operación crucial y que a menudo cambia.

Esto permite a los operadores mejorar la calidad de la imagen cuando se necesitan detalles finos, como cuando búsqueda y adquisición de muestras. Por el contrario, la calidad puede disminuir y la frecuencia aumentar cuando se desea una alimentación de imagen más suave, como cuando se conduce el móvil.

6.3 - Navegación Autónoma

El sistema NAS (Navigation Assistance System) proporciona información precisa sobre la posición y orientación del rover para telemetría y ejecución de movimientos autónomos. Todo esto es gracias a la fusión de un GPS con una IMU para estimar la posición, velocidad y orientación y al uso de un filtro EKF que ayuda a reducir considerablemente el ruido en el sistema de los sensores proporcionando una mejor estimación.

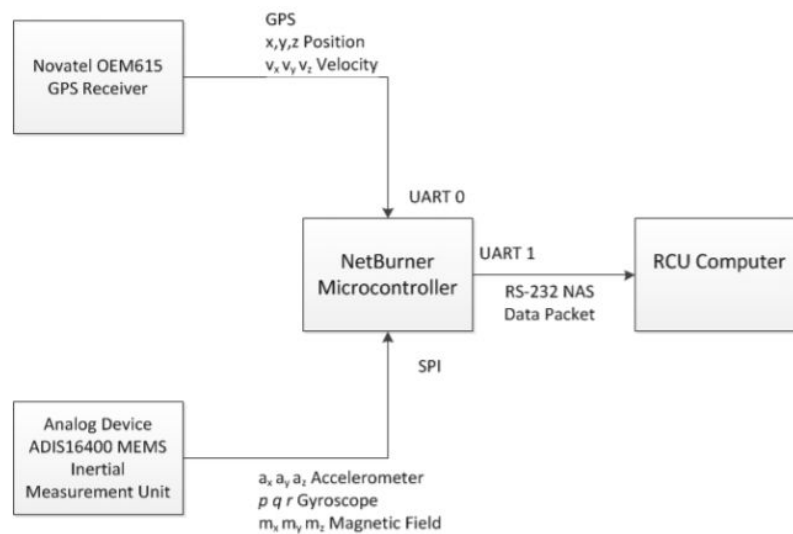


Figura 43 - NAS

Se ha programado un sistema sencillo de navegación autónoma que permite al operador indicar una coordenada (latitud y longitud) para que el rover se dirija a dicho punto. Dado que el robot se mueve en una pequeña área, se supone que el planeta es plano para minimizar la complejidad de los cálculos. El algoritmo coge una posición destino proporcionada por el operador, calcula el rumbo y el rango hasta él y obtiene información de la salida del sistema NAS para determinar el camino hacia la posición destino y el estado del recorrido.

El recorrido termina cuando el rover ha alcanzado un área cercana a la posición destino que esté dentro del error límite especificado. El proceso de navegación autónoma emplea la misma protección anti fallos que la teleoperación normal, donde en caso de cualquier fallo en la comunicación hace que el rover se detenga inmediatamente. Además, el operador puede pararlo en cualquier momento pulsando el botón en la OCU o controlando manualmente el rover. La velocidad calculada de rango y recorrido son usadas para estimar el tiempo que tarda el rover en hacer el viaje. Si el robot no consigue llegar a la posición destino en un tiempo determinado, se para y notifica su estado al operador.

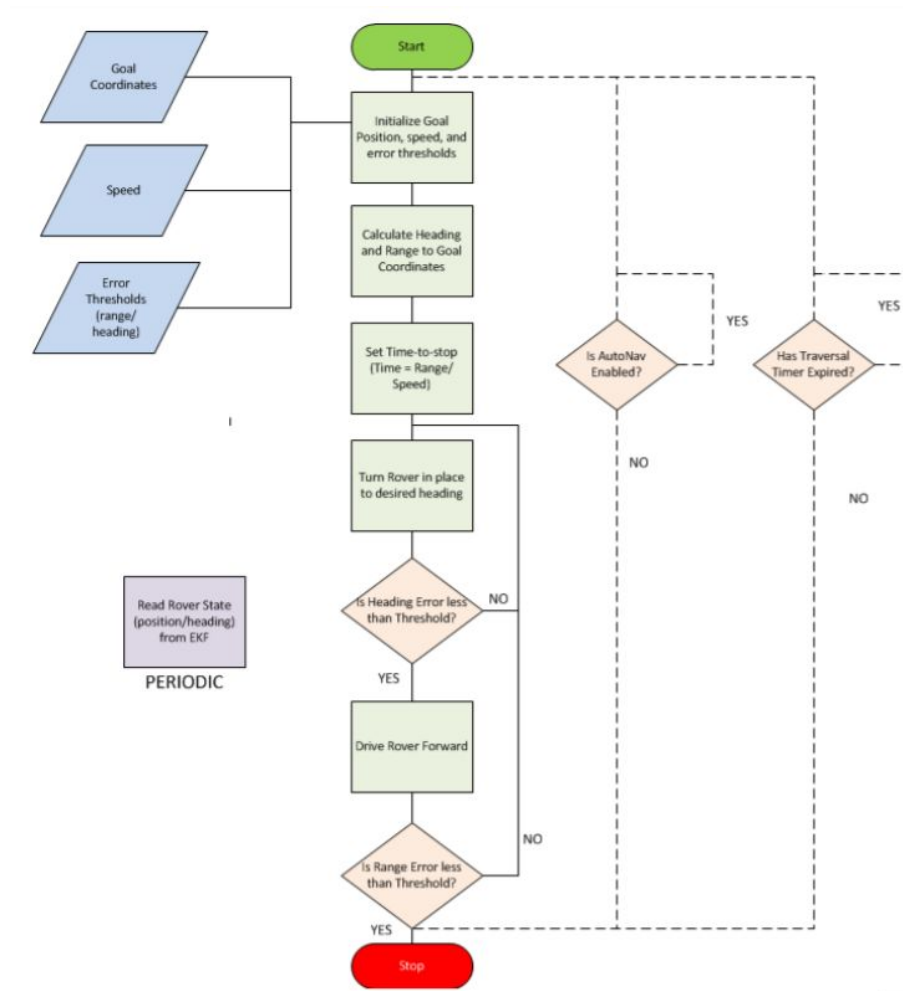


Figura 44 - Diagrama del algoritmo

7 - Vídeo de presentación

El enlace al vídeo de presentación subido en drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/1AkuaGgPH61i-xq9HuWROZnawY9whBVRn?usp=sharing>

8 - Bibliografía

- [1] <https://mars.nasa.gov/mer/mission/technology/severe-environments>, tecnologías para entornos severos para el rover de Marte.
- [2] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/body/>, datos sobre el cuerpo base del robot Curiosity.
- [3] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/summary/>, sumario del robot Curiosity.
- [4] <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/body/>, datos sobre el cuerpo base del robot Perseverance.
- [5] <https://mars.nasa.gov/mer/mission/rover/body/>, datos sobre el cuerpo base del robot Opportunity.
- [6] <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/body/>, diferencias entre el robot Perseverance y el Curiosity.
- [7] <https://www.mars-one.com/faq/technology/how-does-the-mars-base-communicate-with-earth>, How does the Mars base communicate with Earth? Mars One.
- [8] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/brains/>, Mars Curiosity Rover, Brains. NASA.
- [9] <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/brains/>, Mars 2020 Rover, Brains. NASA.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_embedded_computer_systems_on_board_the_Marsrovers, Comparison of embedded computer systems on board the Mars rovers. (7, Febrero de 2019). Wikipedia.
- [11] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/instruments/summary/>, Mars Curiosity Rover, Spacecraft, Instruments. NASA.
- [12] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/instruments/summary/>, Mars Curiosity Rover, instruments.
- [13] <https://mars.nasa.gov/resources/3744/illustrating-mastcam-capabilities-with-a-terrestrial-scene/>, Illustrating MastCam Capabilities with a Terrestrial Scene. (22, Noviembre de 2011). NASA.
- [14] - <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/cameras/>, The Cameras on the Mars 2020 Perseverance Rover. NASA,
- [15] <https://mars.nasa.gov/mer/mission/rover/wheels-and-legs/>, sistema de ruedas, suspensión y velocidad del robot Opportunity.

- [16] <https://mars.nasa.gov/mer/mission/technology/autonomous-planetary-mobility/> , sistema mejorado de movilidad del robot Opportunity.
- [17] <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/wheels/> , sistema de ruedas, suspensión y velocidad del robot Perseverance.
- [18] <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/wheels> , sistema de ruedas, suspensión y velocidad del robot Curiosity.
- [19] M. Maimone, Y. Cheng, and L. Matthies, "Two Years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers," J. Field Robotics, Mar. 2007, pp. 169-186.
- [20] <https://mars.nasa.gov/mer/mission/technology/autonomous-planetary-mobility/> sistema de navegación.
- [21] W.S. Kim et al., "Targeted Driving Using Visual Target Tracking on Mars: From Research to Flight," to appear in J. Field Robotics, 2008.
- [22] P. Backes et al., "Automated Rover Positioning and Instrument Placement," Proc. 2005 IEEE Aerospace Conf., IEEE Press, 2005, pp. 60-71.
- [23] M. Bajracharya et al., "Visual End-Effector Position Error Compensation for Planetary Robotics," J. Field Robotics, May 2007, pp. 399-420.
- [24] A. Castano et al., "Automatic Detection of Dust Devils and Clouds on Mars," Machine Vision and Applications J., Oct. 2008, pp. 467-482.
- [25] D. Helmick, A. Angelova, and L. Matthies, "Terrain Adaptive Navigation for Planetary Rovers," to appear in J. Field Robotics, 2008.
- [26] <https://mars.nasa.gov/msl/mission/communications/> sistema de comunicaciones del rover.
- [27] https://www.abc.es/ciencia/abci-siete-minutos-terror-marte-y-otra-202004130203_noticia.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F, los siete minutos de terror.
- [28] <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1602&context=etd>, proyecto de un MARS.