

Ingenuity

Un helicóptero en Marte

Carlos Poveda Tortosa, Alberto García Martín

Enero de 2024

Introducción

- Ingenuity es un helicóptero autónomo diseñado para la misión Mars 2020. Inicialmente, era una prueba de concepto para la exploración de puntos de interés en Marte y asistencia en la planificación de rutas óptimas para el rover Perseverance.
- Casi tres años después de haber realizado el primer vuelo sobre Marte en abril de 2021, sigue activo continuando su exploración. El 6 de enero de 2024 realizó su vuelo número 71 sobre el planeta rojo. El objetivo inicial era que realizara entre 1 y 5 vuelos en un periodo de 31 días.



Diseño mecánico (I)

Sobre el diseño mecánico del robot *Ingenuity*:

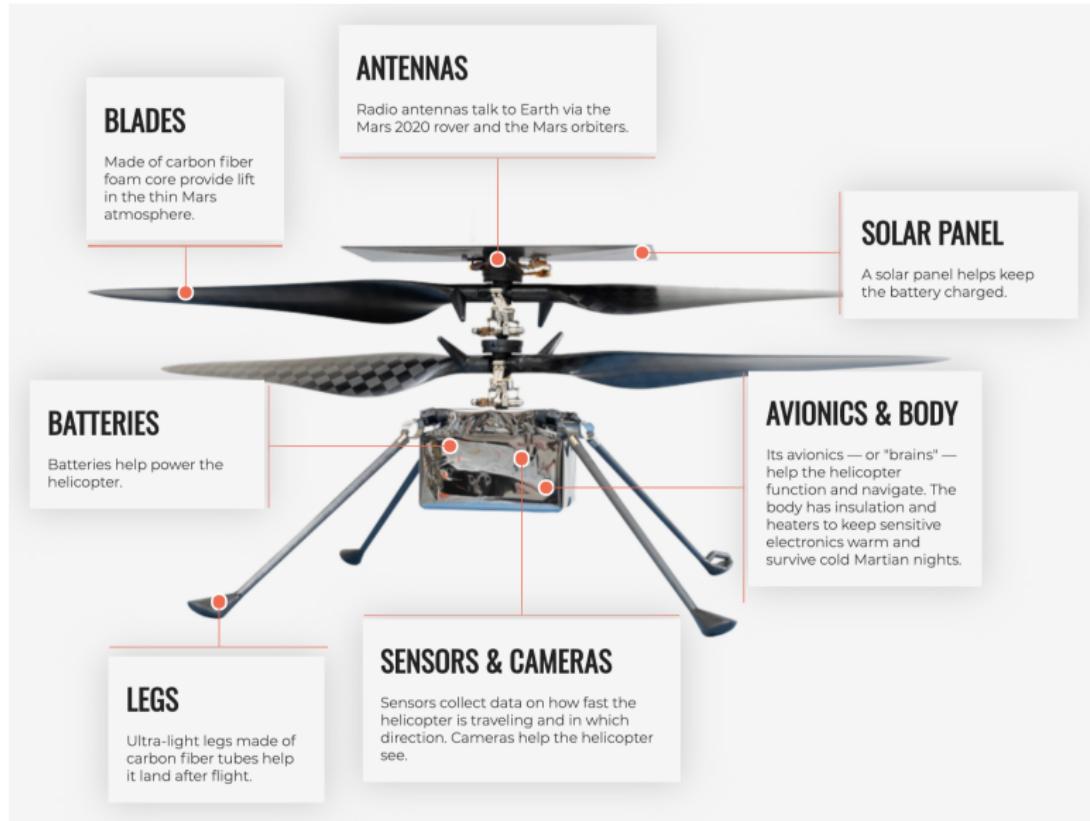
- Fuselaje rectangular de $136mm \times 195mm \times 163mm$
- Rotores coaxiales contrarrotativos de 1.21 m de diámetro
- Cuatro patas de aterrizaje de $384mm$ cada una
- Panel solar para recargar baterías y proporcionar energía
- Altura total de $490mm$

Diseño mecánico (II)

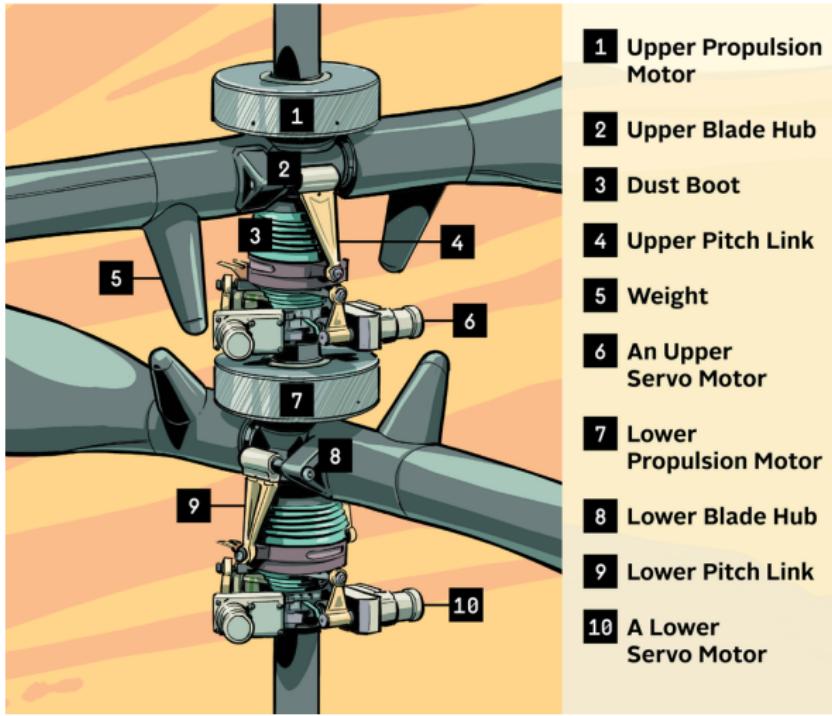
Para volar en Marte:

- Gravedad parcialmente compensada por la delgadez de la atmósfera
- Densidad atmosférica alrededor de una centésima parte de la de la Tierra
- Palas giran entre 2400 y 2900 rpm
- Materiales ligeros pero resistentes para soportar aceleración y vibraciones durante el lanzamiento

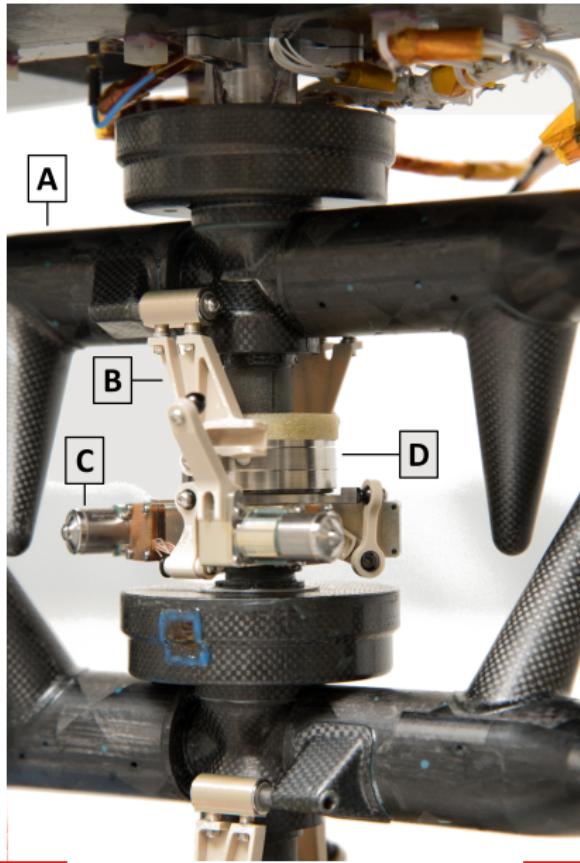
Diseño mecánico (III)



Diseño mecánico (IV)

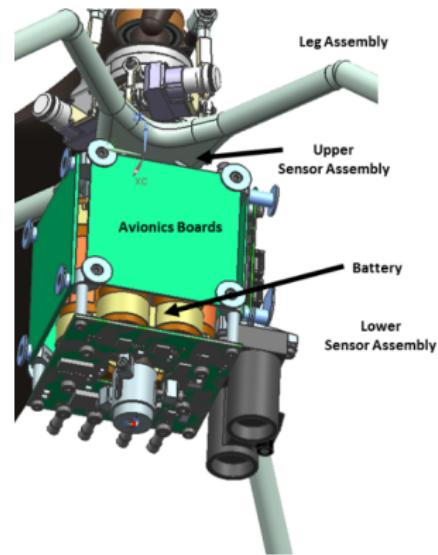


Diseño mecánico (V)



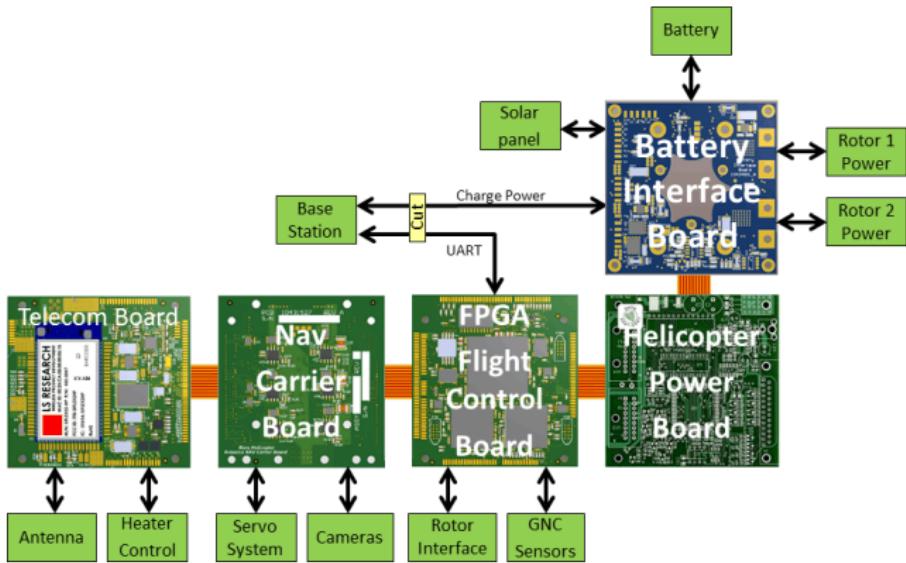
Sensores

- Todos los componentes electrónicos son de uso general y están disponibles comercialmente.
- Dos IMUs, Bosch Sensortech BMI-160 (10\$), miden la aceleración y los cambios en orientación y ángulo.
- Un altímetro, Garmin Lidar-Lite-V3 (130\$), mide la distancia al suelo utilizando láser.
- Un inclinómetro, muRata SCA100T-D02 (10\$), se utiliza antes del despegue para medir la inclinación de la superficie.
- Tras el primer año el inclinómetro se averió, uno de los IMUs pasó a realizar su función después de recibir una actualización de software.



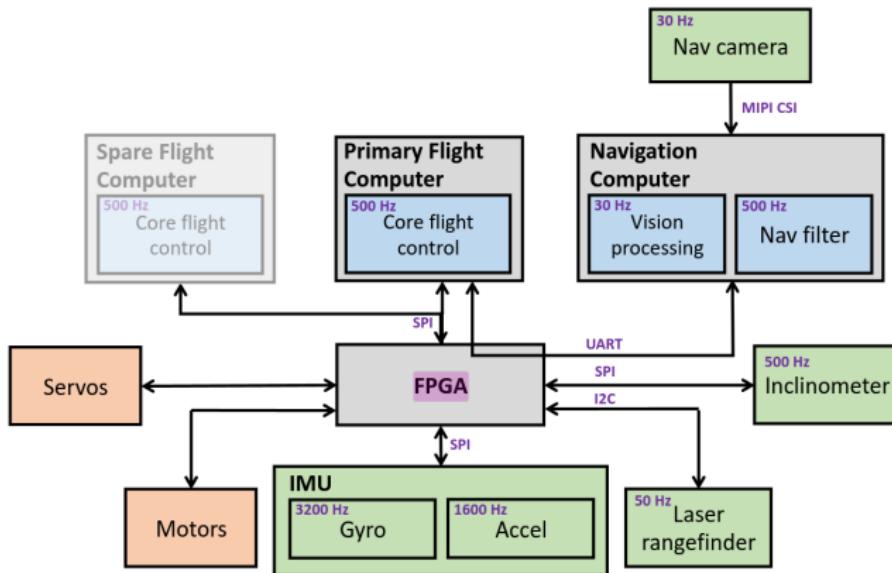
FPGA

- En el corazón de la electrónica se encuentra una FPGA, MicroSemi ProASIC3L (1011\$). Es resistente a la radiación y se encarga de gestionar la entrada y salida de todos los sensores y actuadores.



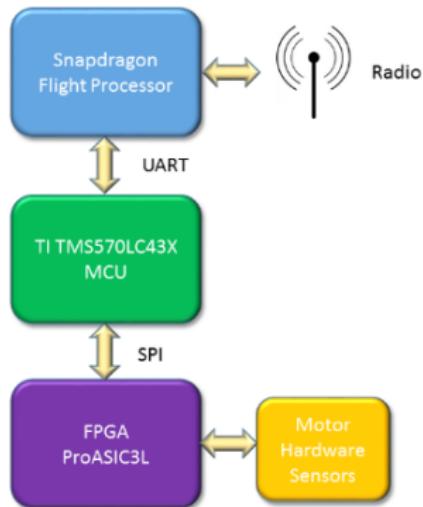
Microcontrolador

- Dos microcontroladores, Texas Instruments TMS320LC43x (60\$), operan de manera redundante, procesando los datos de sensores para realizar las funciones de control de vuelo necesarias para mantener el vehículo en el aire.



Procesador

- El procesador que ejecuta las funciones de alto nivel es un Snapdragon 801 de 4 núcleos a 2.26 GHz con 2 GB de RAM y 32 GB de memoria flash (849\$).
- Se encarga de la navegación visual, procesando las imágenes de la cámara y aplicando los filtros para el control de vuelo, también realiza la gestión de datos, procesamiento de órdenes, generación de telemetría y comunicación por radio.
- Utiliza un sistema operativo Linux tradicional, comunicándose con el resto de sistemas sin garantías de tiempo real y fiabilidad.



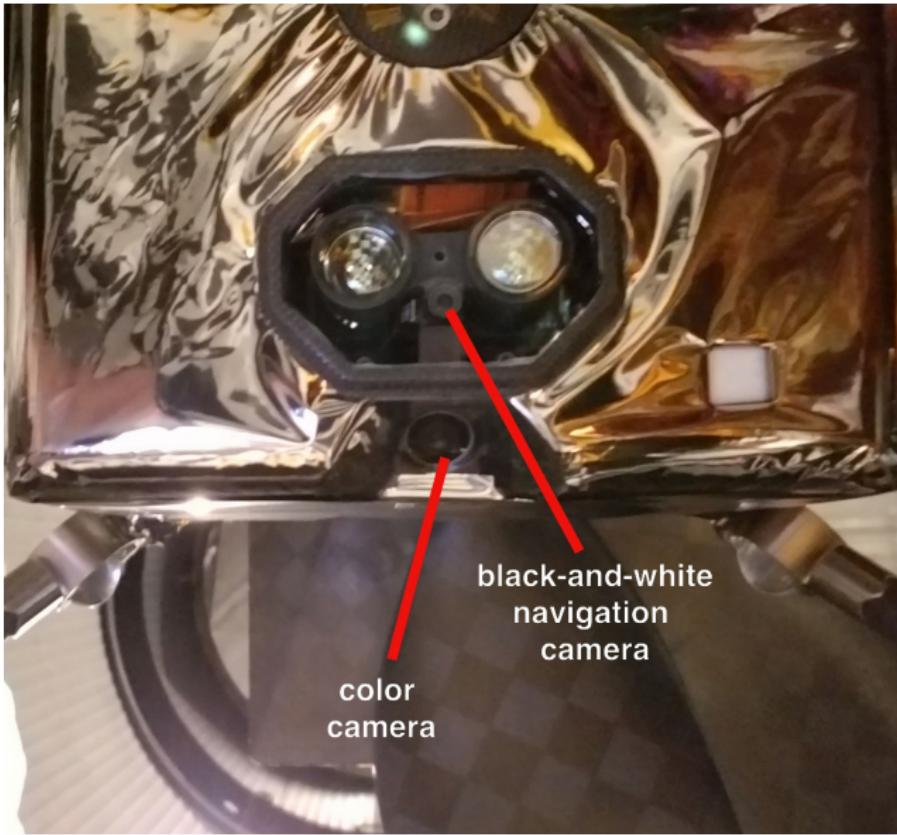
Sistemas de comunicación y energía

- Ingenuity solo puede comunicarse con la Tierra a través de un enlace de radio con el rover. Este enlace se lleva a cabo mediante Zig-Bee, con el transmisor LS Research SiFlex 02 (10\$), pudiendo transmitir datos a distancias de hasta 1000 m a 250 kbps.
- El sistema de energía consiste en una batería de iones de litio (6x Sony SE US18650 VTC4, 6\$) recargada diariamente por un panel solar. La energía se utiliza tanto para calentar y sobrevivir a las frías noches marcianas como para operar los actuadores y la aviónica durante vuelos cortos.
- De la capacidad efectiva de 35.75 Wh, se mantienen siempre 11 Wh como reserva, otros 21 Wh se reservan para calentar el robot durante la noche, y del resto de energía restante un 80 % se usa para mantener una temperatura adecuada durante el vuelo, cuya duración está limitada a unos 90 s.

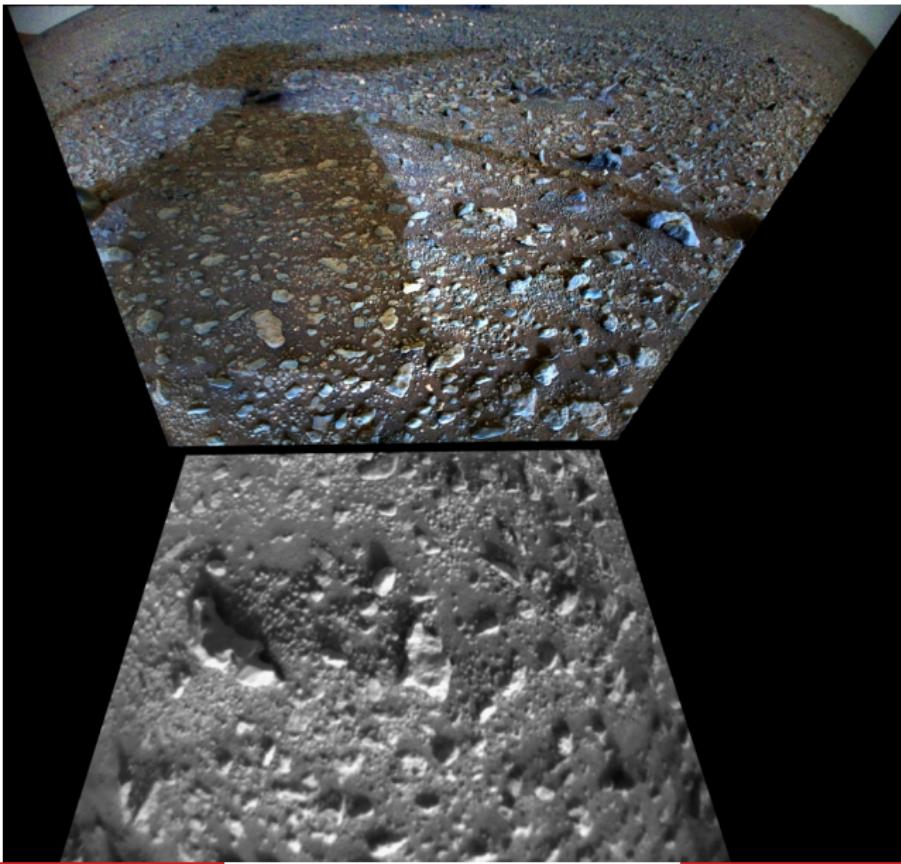
Cámaras

- Cámara de navegación (NAV): Es una cámara en blanco y negro de 640×480 píxeles que apunta hacia el suelo y se utiliza para la navegación visual.
- Cámara Return to Earth (RTE): Es una cámara de alta resolución (de 4208×3120 píxeles) a color que mira hacia el horizonte y está destinada a captar fotos.

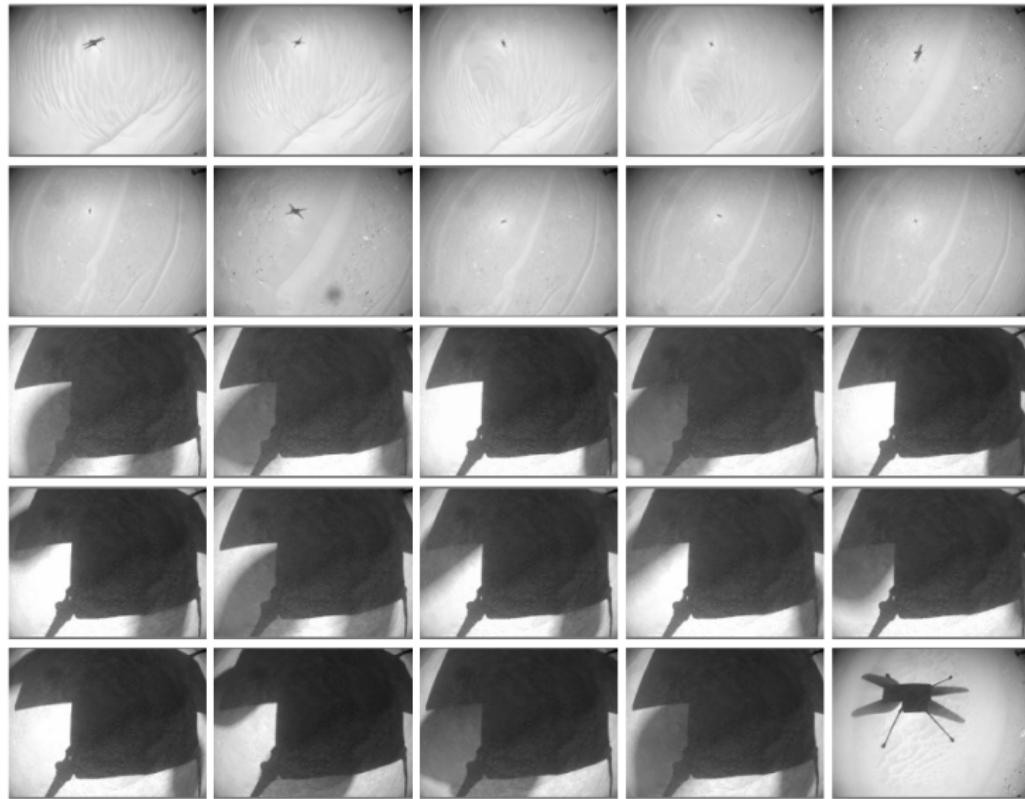
Disposición de las cámaras



Imágenes contextualizadas

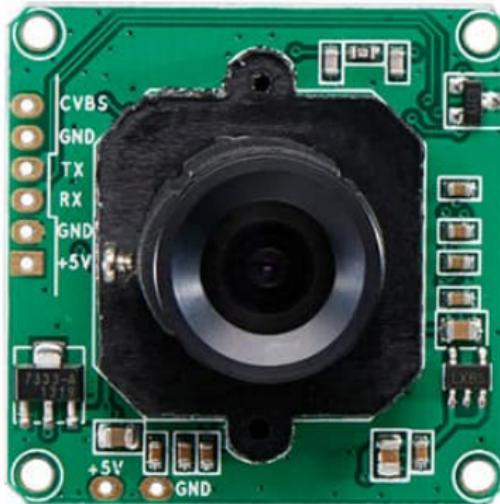


Imágenes tomadas por el Ingenuity



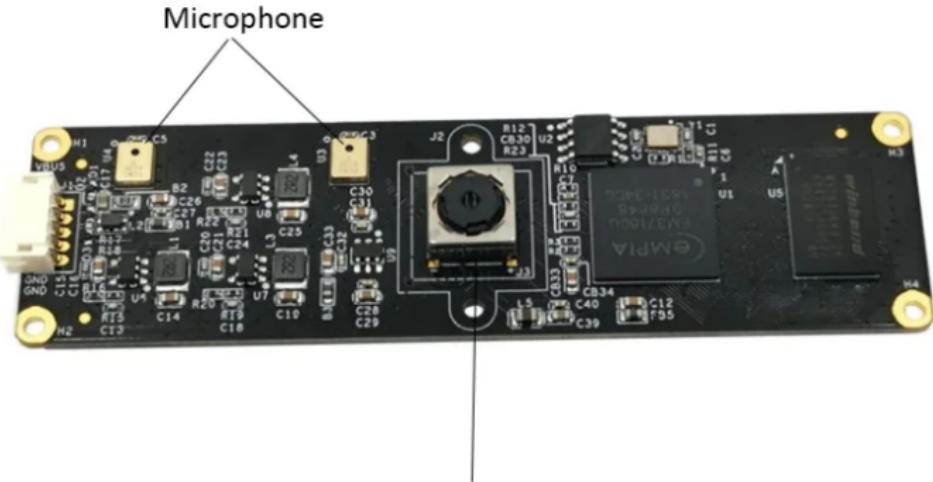
Cámara de navegación (OV7251)

- Sensor de imagen VGA de la compañía **Omnivision**.
- Tecnología **OmniPixel 3-GS**.
- **Bajo consumo y tamaño compacto.**
- Ideal para detección de **profundidad y movimiento**.
- Capacidad de captura de vídeo a alta velocidad (hasta **360 fps** en QQVGA).
- Formato de salida de 10 bits en **blanco y negro**.
- Adecuado para dispositivos como smartphones, tabletas y visores de realidad virtual.
- Precio aproximado: 10 dólares.

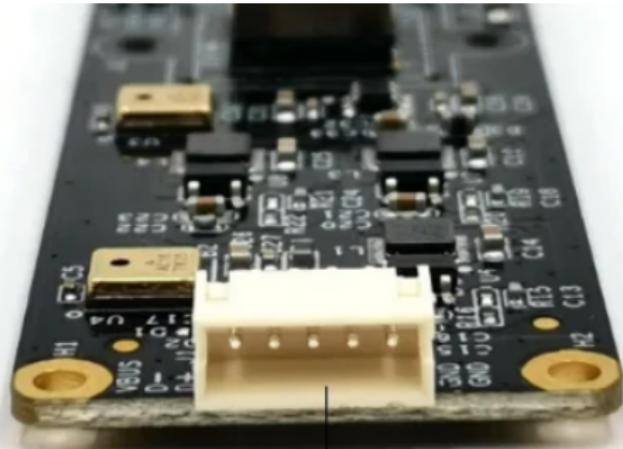


Cámara Return to Earth (IMX214)

- La cámara del Ingenuity utiliza un sensor Sony IMX214 y un módulo óptico de la compañía O-film.
- El IMX214 es un sensor CMOS de 13 megapíxeles con tecnología Exmor RS para captura de imágenes de alta velocidad.
- Proporciona imágenes de alta sensibilidad y bajo ruido, con un filtro de color RGB tipo Moasaico de Bayer.
- Gracias a la tecnología de exposición espacialmente multiplexada, puede lograr imágenes de alto rango dinámico.
- El IMX214 tiene un obturador electrónico con tiempo de integración variable y un bajo consumo de energía.
- Está diseñado para su uso en smartphones y tabletas, con un precio aproximado de 70 dólares.



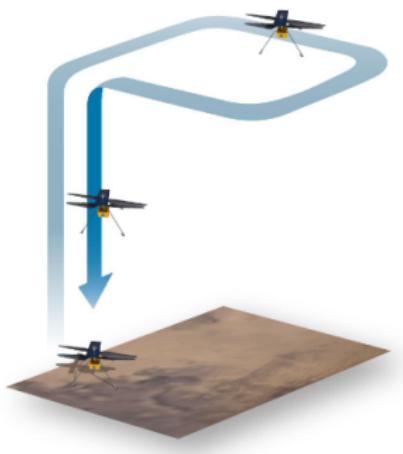
Sony IMX214 4K Auto Focus



USB2.0 Interface

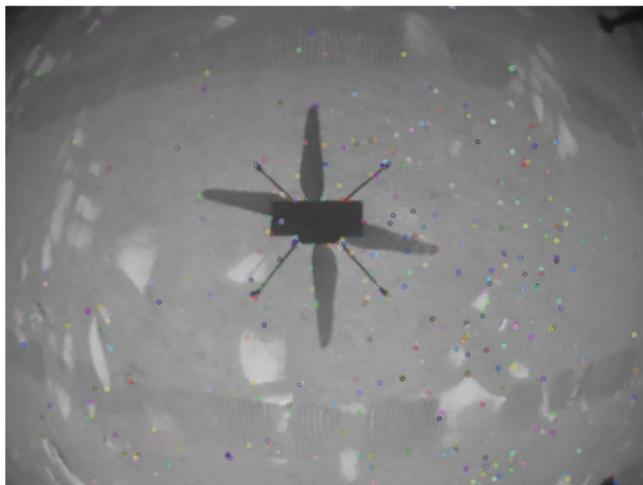
Algoritmos de navegación

- Para determinar el movimiento del robot se usan los datos de aceleración del IMU para utilizar un sistema de navegación inercial durante el despegue y el aterrizaje, cuando el polvo levantado por las aspas pueden obstruir la cámara. El resto del tiempo, la cámara y el altímetro también se utilizan para estimar la posición.
- El altímetro proporciona una medición directa de la altitud del helicóptero, y la cámara toma imágenes que se comparan entre sí para ver cómo el entorno parece haberse movido en relación con la cámara, un proceso llamado odometría visual.



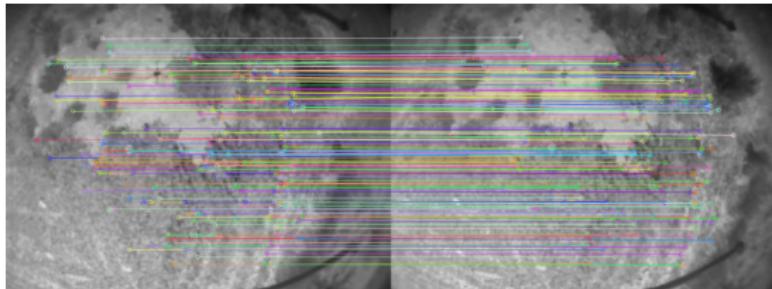
Odometría visual

- Ingenuity utiliza odometría visual dispersa: para cada fotograma, se identifican unas pocas docenas de puntos distintivos, y solo esos puntos son rastreados de fotograma a fotograma. La imagen se procesa para identificar estas características y también calcular una firma para cada una, de modo que puedan coincidir con características correspondientes en fotograma anteriores y futuros. Se emplea el algoritmo FAST para identificar características.



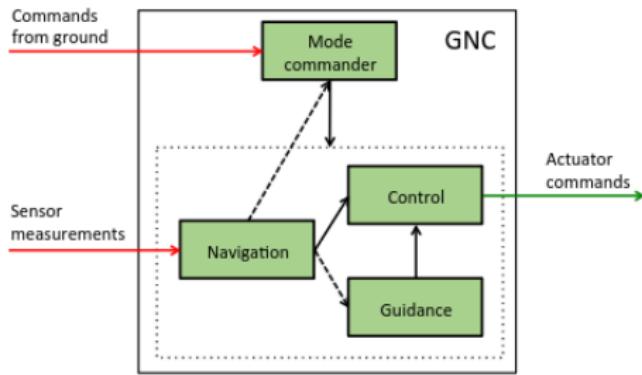
Algoritmo MAVeN

- MAVeN es el algoritmo de odometría visual desarrollado por la NASA, encuentra el mayor conjunto de características que se mueven consistentemente y estima el movimiento del helicóptero a partir de ellas.
- MAVeN asume que el helicóptero vuela sobre terreno plano, por lo que la profundidad de todas las características es la misma y se conoce a partir del altímetro. También incorpora las mediciones de la IMU para producir la estimación completa de la posición, orientación y velocidad del helicóptero. El controlador de vuelo puede entonces utilizar esta entrada para ajustar los controles y lograr el movimiento deseado.



Sistema de control del vuelo

- El sistema de control de vuelo se divide en cuatro subsistemas: Comandante de modo, Guiado, Navegación y Control. El helicóptero requiere control en un lazo cerrado constante. La fiabilidad del sistema se ve desafiada por factores ambientales y posibles fallos internos. A pesar de la latencia del sistema de Navegación, el subsistema de Control siempre opera en tiempo real con información actualizada, asegurando así la estabilidad robusta durante el vuelo.



Software de vuelo de código abierto

- El software de control de vuelo que utiliza Ingenuity está implementado en C++ y estructurado como un conjunto de callbacks dentro del marco de software de vuelo F Prime (F').
- F' fue desarrollado por la NASA para su uso en sistemas de pequeña escala y proporciona un marco para la ejecución, sincronización y comunicación entre múltiples grupos, hilos y procesos en unidades de hardware separadas, así como mecanismos para el manejo de parámetros, registro y grabación de eventos.
- En 2017 fue liberado como código abierto, permitiendo su adopción en proyectos universitarios, ofreciendo soluciones para servicios de software de vuelo y demostrando ser una herramienta valiosa tanto para la enseñanza como para la investigación.

Eso es todo ¿Alguna pregunta?



Figura: Maqueta del posible sucesor del Ingenuity