

Determinación de la actitud angular de una sonda suborbital mediante cámara digital y sistemas embebidos

Oviedo C. Carlos N.⁽¹⁾, Zimmermann Yamil E.⁽¹⁾, Turra Daniel N.⁽¹⁾,
González Gustavo J.⁽²⁾, Cova Walter J.D.⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾GPS-Grupo Proyectos y Servicios

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja,
San Nicolás de Bari (E) 1100, (5300) La Rioja, Argentina.

⁽²⁾Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba
Maestro M. López y Cruz Roja Argentina, (5000) Córdoba, Argentina.

Resumen— El presente trabajo detalla el desarrollo de un sistema embebido basado en hardware comercial de bajo costo para la captura y procesamiento de imágenes del horizonte de la tierra tomada a lo largo de la trayectoria apical de una carga útil suborbital con el objetivo de obtener información de la posición angular del cuerpo alrededor de su eje longitudinal. Ello requiere de un procesamiento digital para determinar la posición de la transición tierra-espacio (borde del horizonte) en el plano de la imagen, para luego utilizarla como una señal de actitud angular integrada en el sistema de estabilización de la carga útil. Para la implementación se empleó una single board computer Raspberry Pi con un sistema operativo basado en Linux, al que se integra una cámara RaspiCam, empleando Qt-5 como compilador. Se presenta entonces la utilización de una cámara digital, como sensor de horizonte de bajo costo, implementando un software embebido para el procesamiento de la imagen. Se evaluó el tiempo de procesamiento de imagen determinándose su compatibilidad con los requerimientos del sistema de control. Adicionalmente se analizó la eventualidad de un enfoque directo de la cámara hacia el sol, determinándose la necesidad de contar con un inhibidor para evitar que los efectos de persistencia de imagen afecten la performance del sistema de control.

Palabras clave— Sensor de horizonte; Procesador Raspberry Pi; Cámara digital; Tiempo de procesamiento; Persistencia de imagen.

I. INTRODUCCIÓN

La utilización de cámaras digitales para la determinación de la actitud de vuelo de micro satélites ha sido descrita en diversas publicaciones [1-3], las que asimismo presentan algoritmos de detección de horizonte basados en el contraste tierra-espacio tanto en el espectro visible como en el infrarrojo.

En las aplicaciones suborbitales (como la graficada en la Figura 1), debido a la corta duración del segmento de trayectoria útil, resulta de interés lograr una rápida estabilización de la actitud del vehículo (o carga útil), a fin de maximizar el tiempo disponible para la realización de las experiencias

científicas embarcadas. La brevedad de la misión, conduce a su vez a dar preferencia en la implementación del sistema de control de actitud, al empleo de sensores y actuadores robustos y de bajo costo, pero sin que los condicionamientos económicos afecten los requerimientos de confiabilidad operativa.

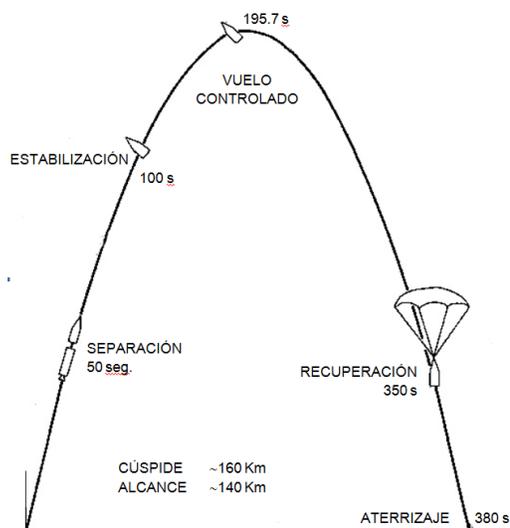


Fig. 1. Ejemplo de trayectoria suborbital y sus principales eventos.

El presente trabajo expone la implementación de un sistema de control de actitud basado en componentes electrónicos de uso civil y comercial y software libre, centrandose la presentación en los aspectos relacionados al procesamiento de imagen y su influencia sobre la performance global del sistema. La organización del trabajo es la siguiente: en la Sección II se sintetizan las condiciones generales de operación del sistema de control y los requerimientos de performance para el procesamiento de imágenes que de ellas se deducen. La selección de hardware y la plataforma operativa de software se exponen en la Sección III. En la

El presente trabajo es parte del Proyecto de Investigación y Desarrollo Interfacultades financiado por la Universidad Tecnológica Nacional, código AMIFNLR0003995: *Desarrollo de Sensor de Horizonte Basado en Cámara Digital*, ejecutado en forma conjunta por las Facultades Regionales La Rioja y Córdoba, con el apoyo de los laboratorios del Centro de Investigaciones Aplicadas (CIA) perteneciente a la Fuerza Aérea Argentina.

Sección IV se trata la evaluación del funcionamiento del sistema embebido implementado (en especial: tiempo de procesamiento y de persistencia de imágenes de alta luminosidad). Finalmente, las conclusiones y futuros desarrollos se exponen en la Sección V.

II. CONDICIONES DE OPERACIÓN

La Figura 2 muestra la posición nominal de la carga útil estabilizada a una altura (h) dada, para la cual el horizonte terrestre subtende el ángulo $\beta/2 \approx 90^\circ - [h \text{ (km)}]^{1/2}$. En esas condiciones hipotéticas, el eje longitudinal de la carga útil se encuentra orientado según alguna dirección unívocamente determinable con la instrumentación de abordo (p.ej. con el campo magnético terrestre \mathbf{B} , si se cuenta con magnetómetros), mientras que uno de los ejes transversales (asociado al eje óptico de la cámara) se encuentra “enganchado” con el horizonte visible. La existencia de perturbaciones aerodinámicas y gravitatorias –si bien son de baja intensidad a las alturas de vuelo consideradas– afectarán la orientación de la carga útil, por lo que en definitiva el vehículo se encontrará oscilando en un ciclo

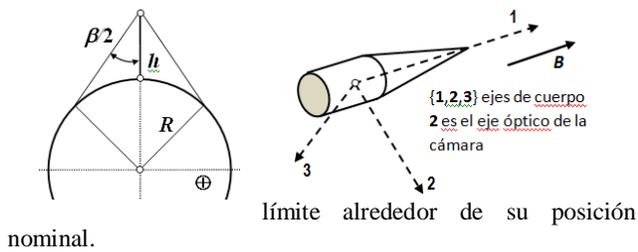


Fig. 2. Ángulo del horizonte y esquema de la carga útil

Por otra parte, la limitación de los recursos energéticos disponibles durante el vuelo (p. ej. la cantidad de gas disponible, en el caso de aplicar estabilización por eyección de gas en operación bang-bang), obligan la existencia de un ciclo límite de movimiento, definido por una serie de factores tales como las tolerancias de posicionamiento (condicionadas a su vez por la naturaleza de la experiencia científica embarcada), la duración mínima de accionamiento, la disponibilidad temporal de información de los sensores angulares y la caracterización estadística de las perturbaciones actuantes sobre el cuerpo, tal como se discutiera en [4].

A fin de establecer la influencia que posee la disponibilidad de información de actitud angular respecto del horizonte sobre los requerimientos energéticos operativos, se realizaron una serie de simulaciones numéricas. Se plantearon experimentos ideales con el vehículo rotando alrededor de un único eje, considerándose nulas las condiciones iniciales para los otros ejes y asimismo nulas las perturbaciones. En las condiciones descritas, la dinámica de la carga útil se corresponde con la de un cuerpo libre de rotar sin perturbaciones alrededor de su eje de simetría (doble integrador), cuya posición angular y velocidad es controlada mediante actuadores todo-nada (control bang-bang). En la situación considerada, las Figuras 3 y 4 presentan la evolución dinámica del cuerpo en el plano de fase, mostrando la

velocidad angular (en grados/seg) versus posición (en grados) para dos casos extremos de las simulaciones numéricas.

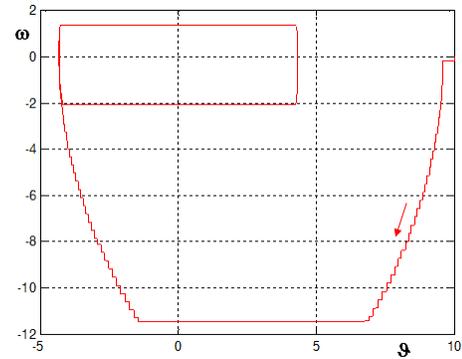


Fig. 3. Operación a 16 fotogramas por segundo.

El primer caso corresponde a una frecuencia de toma de imágenes de 16 fps (fotogramas por segundo o “frames per second”), mientras que el segundo corresponde a una frecuencia de 2 fps.

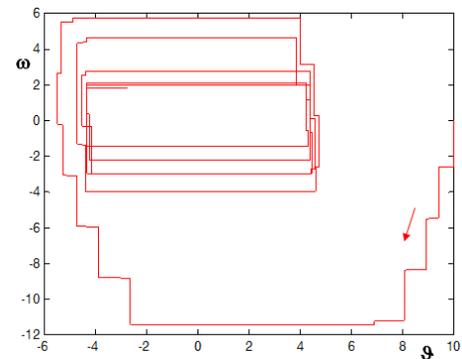


Fig. 4. Operación a 2 fps.

Las condiciones iniciales para las Figuras 3 y 4 son iguales, partiéndose de $\omega_0 = 0(^{\circ}/s)$ y $\theta_0 = 10(^{\circ})$. Los diagramas corresponden a una ley de control bang-bang que aplica aceleraciones de $\{-0.4, 0, +0.4\} \text{ rad/s}^2$ con una duración mínima de 0.150 s. El umbral de posicionamiento angular ha sido establecido en $\theta_R = 0.075 \text{ rad} = 4.3^{\circ}$.

Nótese que para los parámetros indicados, la amplitud teórica del ciclo límite en velocidad es $\Delta\omega = 0.15s \times 0.4 \text{ rad/s}^2 = 0.06 \text{ rad/s}$, es decir $\Delta\omega = 3.44^{\circ}/s$. Operando a 16 fotogramas por segundo el comportamiento dinámico de lazo cerrado se corresponde casi exactamente al que puede obtenerse para una disponibilidad continua del sensor angular, mientras que para 2 fotogramas por segundo el comportamiento se degrada muy sensiblemente, incrementándose el tiempo de adquisición (es decir el tiempo de entrada en ciclo límite) y consecuentemente se incrementa la energía que consume el sistema. En consecuencia resulta necesario determinar con precisión el tiempo requerido para obtener y procesar la información angular que proporciona la imagen captada por la cámara digital, a fin de validar su aplicabilidad como sensor.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente se procedió a analizar cada uno de los elementos y procesos componentes del proyecto, tales como la estabilización de un cuerpo en el espacio sometido a cuplas de reacción y los requerimientos de hardware. Luego se investigaron las opciones existentes en el mercado de placas de desarrollo y cámaras digitales. Entre las principales opciones se analizaron las siguientes con sus precios promedio (junio 2016):

- Arduino Due más cámara tipo OV7670 USD 100
- Beaglebone Black kit con cámara USD 125
- Raspberry Pi modelo B con Raspicam USD 110

Cabe destacar que una cámara web convencional no es utilizable, debido a que generalmente brindan imágenes con compensación automática de brillo, color y balance de blancos, mientras que en nuestro caso deseamos trabajar con la imagen cruda (RAW) al objeto de tener una buena diferenciación entre claros y oscuros para determinar la transición tierra-espacio que define el horizonte.

Posteriormente se ensayaron distintos métodos y formatos para el procesamiento de imágenes, evaluando sus requerimientos temporales y de memoria. Pero en definitiva, la selección final estuvo condicionada por la disponibilidad inmediata de Raspberry y sus accesorios en el mercado local, ya que todas las placas analizadas cumplían con los requisitos mínimos y se encontraban dentro del presupuesto con el que se contaba. Los elementos seleccionados se describen en los apartados siguientes.

A. Raspberry Pi 3 modelo B

Entre los productos comerciales de hardware analizados se seleccionó Raspberry Pi 3 modelo B (Figura 5) debido a las facilidades de programación en distintos lenguajes, la posibilidad de contar con un extenso GPIO para el control a implementar y fundamentalmente por su puerto dedicado para cámara digital (RaspiCam), el cual como sabemos se puede expandir para agregar más cámaras como se desea hacer en un futuro.



Fig. 5. Raspberry Pi 3 Modelo B junto con RaspiCam v1.3

B. RaspiCam V1.3

Esta cámara es de reducido tamaño $25 \times 20 \times 9$ mm, sensor OV5647 con resolución de hasta 5 megapíxeles generando imágenes de 2592×1944 píxeles, foco fijo y grabación de vídeo a 1080p y 30 fps. Además, esta cámara permite la obtención de la imagen en distintas calidades y formatos, con compensación de brillo, color y balance de blancos. Pero su cualidad más importante es la capacidad de obtención de la imagen cruda (sin ninguna compensación ni procesamiento como los mencionados), sobre la cual es posible trabajar a nivel de pixel e individualizando los tres componentes primarios de color (RGB).

C. Entorno de Desarrollo de Software

Se optó por embeber el sistema operativo Raspbian y en el entorno de programación se empleó el compilador Qt versión 5. Raspbian es una distribución del sistema operativo GNU/Linux y por lo tanto libre basado en Debian Wheezy (Debian 7.0) para la placa de desarrollo (SBC) Raspberry Pi. Al ser una distribución de GNU/Linux cualquier software de código abierto puede ser utilizado en la propia placa de desarrollo.

Por lo que respecta al compilador, Qt es un framework multiplataforma orientado a objetos ampliamente usado para desarrollar programas que usen interfaz gráfica de usuario, así como también diferentes tipos de herramientas para la línea de comandos y consolas para servidores que no necesitan una interfaz gráfica de usuario. Qt utiliza el lenguaje de programación C++ de forma nativa, adicionalmente puede ser utilizado con varios otros lenguajes de programación.

IV. APLICACIÓN DESARROLLADA

A. Esquema Conceptual

En la Figura 6 se muestra el diagrama de bloques que representa conceptualmente el sistema de control de actitud para el eje de rolido de la carga útil.

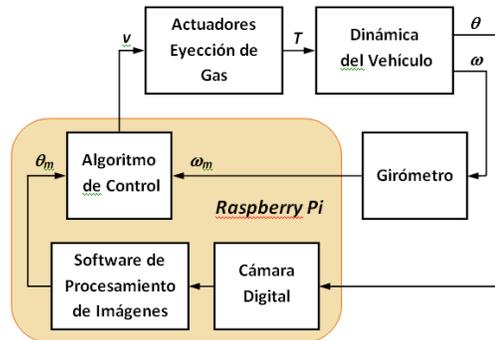


Fig 6. Diagrama de bloques del sistema de control de actitud.

En la placa de desarrollo se encuentran embebidos tanto el software de procesamiento de las imágenes obtenidas por la cámara, como el algoritmo de control que recibe la señal de velocidad angular ω_m (proporcionada por el girómetro) junto con el ángulo θ_m medido a través de la imagen. Su salida v activa a través de la GPIO de la placa Raspberry Pi la

electrónica de comando de los eyectores de gas, generando una cupla T en el sentido necesario para reducir los errores en la actitud θ y en la velocidad angular ω del vehículo.

B. Procesamiento de Imagen

El programa embebido en Raspberry Pi 3 ordena la captura de una imagen mediante la cámara digital y posteriormente ejecuta el procesamiento pertinente para determinar el ángulo respecto del horizonte. Este procedimiento se repite periódicamente en intervalos que, estimativamente, no debieran superar los 50 ms.

La cámara digital envía a la CPU una imagen con formato RAW RGB sin compresión, y 8 bits de profundidad de color. La aplicación desarrollada en Raspberry Pi 3 analiza el color de cada píxel y efectúa su binarización por comparación contra un umbral preestablecido. Ya que se desea detectar el borde que delimita la tierra, se procesa solo el color azul, de manera tal de diferenciarla respecto del espacio. Luego del proceso, los píxeles más oscuros que el umbral quedarán en negro y los píxeles más claros se convertirán en blanco. Con ello, la imagen del horizonte queda binarizada, en base a la cual, mediante el procedimiento expuesto en [5] y que a continuación se sintetiza, se puede calcular el ángulo θ del eje de la cámara respecto del horizonte.

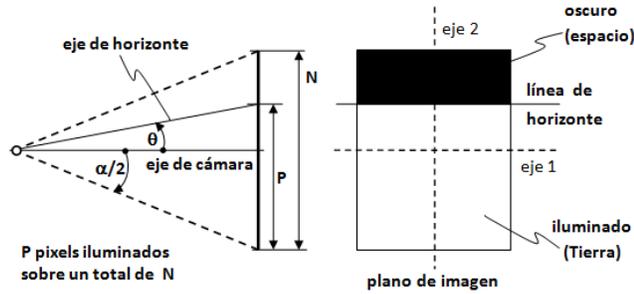


Fig. 7. Esquematación geométrica de la imagen del horizonte.

De la Figura 7 se deduce, en base a la semiapertura de cámara $\alpha/2$:

$$\frac{\tan(\theta)}{\tan(\alpha/2)} = \frac{(P - N/2)}{N/2} = \left(\frac{2P}{N} - 1\right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\left(\frac{2P}{N} - 1\right) \cdot \tan(\alpha/2) \right]$$

que para $\alpha \leq 30^\circ$ se puede aproximar con un error máximo menor que 0.15° mediante la expresión lineal:

$$\theta \approx \left(\frac{2P}{N} - 1\right) \cdot \tan(\alpha/2)$$

En [5] se discutió la influencia del desapuntado del eje longitudinal de la carga útil respecto de la dirección de referencia sobre el error en el ángulo θ sentido, determinándose que su influencia es mínima si el desapuntado está comprendido dentro de un cono de 15° semiapertura.

En definitiva, la componente azul de la imagen captada por la cámara es binarizada por comparación con un umbral, luego de lo cual se cuentan los puntos oscuros, cuya relación con la totalidad de puntos que integran la imagen es directamente proporcional al ángulo del horizonte.

Con el objeto de evaluar el procedimiento expuesto, se utilizó una imagen de la tierra obtenida por NASA [6] generándose la Figura 8, constatándose la correcta implementación del proceso de binarización.

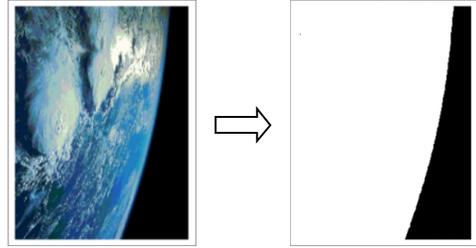


Fig. 8. Binarización de imagen.

Por lo que respecto al tiempo de procesamiento, obviamente será tanto mayor cuanto mayor sea la resolución (cantidad de píxeles de la imagen). Ahora bien, luego de la binarización, la relación entre la cantidad de píxeles blancos y negros de la imagen es independiente de la resolución hasta 480×640 píxeles, con lo que su influencia sobre la determinación del ángulo θ resulta despreciable. El tiempo que tarda el software implementado en procesar una imagen de 480×640 fue de 11.70ms, totalmente compatible con los requerimientos de la ley de control. Para evaluar el tiempo insumido por el algoritmo se utilizó la GPIO de la placa de desarrollo y un osciloscopio digital, programando cambios de estado de una salida GPIO entre el inicio y la finalización del procesamiento de imagen.

C. Imágenes de Alta Luminosidad

Un problema adicional que debió ser abordado es el relacionado con la persistencia de imágenes de alta luminosidad. Se plantea como interrogante si, al pasar el Sol por el campo visual de la cámara digital y ser fotografiado, puede producirse una persistencia de la imagen en la matriz de CCD debido a su elevada luminosidad. Aunque en el espacio cercano el Sol subtende un ángulo de 0.5° , si su imagen persistiera excesivamente en la matriz sensible de la cámara, podría engañar al sistema de control con una señal de falso horizonte.

Para responder al interrogante precedente, en una primera aproximación cualitativa, se diseñó un montaje experimental que permite simular el pasaje del Sol ante la cámara, aislando a ésta de toda otra fuente de iluminación, cuyo diagrama conceptual es el de la Figura 8.

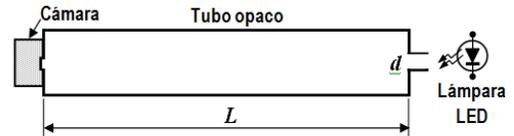


Fig. 8. Medición de persistencia: esquema.

Se trata de un tubo de PVC ϕ 110 mm pintado en su interior de color negro mate para evitar reflexiones, cerrado en sus extremos, en uno de los cuales se ha montado la cámara digital y en el otro una lámpara LED que ilumina al interior del tubo a través de un agujero de diámetro $d=12$ mm, con $L=1.153$ mm, cumpliéndose la relación $d/2L = \tan(0.25^\circ)$. La lámpara LED utilizada posee una temperatura de color de 6000 K muy cercana a la luz solar (5800 K). El nivel de iluminación que produce el sol a 100 Km de altura sobre la superficie terrestre es de unos 125.000 lux; habida cuenta que el rendimiento lumínico de una lámpara LED de alta calidad se encuentra en el orden de 100 a 130 lm/W, la potencia requerida para simular realísticamente la iluminancia solar en nuestro montaje resultaría prohibitiva. Es por ello que se ha optado por una simulación cualitativa con una iluminancia incidente en la cámara del orden de los 500 lux.

El encendido/apagado de la lámpara se controló con un dispositivo IGFET excitado desde una de las salidas GPIO de Raspberry, mientras que otra salida se empleó para señalar la toma de imagen. Mediante un osciloscopio se registraron ambas señales para determinar con precisión el tiempo entre las mismas. El programa de comando permitió la toma de fotogramas sucesivos: el primero con LED encendida, y el siguiente con la lámpara apagada, estando ambas tomas separadas por un retardo de tiempo de duración variable. En las condiciones indicadas se llevaron a cabo una serie de mediciones, pudiéndose establecer que la persistencia máxima de la imagen es de 47 milisegundos.

De ninguna manera puede establecerse una relación de proporcionalidad entre la persistencia determinada a 500 lux y la que ocurriría para una iluminancia 250 veces mayor (sol directo); sin embargo el experimento cualitativo realizado ha permitido identificar una situación de riesgo que debe ser evitada. Ello conduce a recomendar fuertemente el empleo de algún inhibidor solar para evitar que la cámara tome imágenes directas del sol.

V. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha contribuido a confirmar que el uso de single board computers junto con cámaras digitales comerciales de bajo costo pueden integrar ventajosamente (desde un punto de vista económico) un sistema de control de actitud angular de precisión moderada, utilizable en cargas útiles suborbitales.

Se pudo verificar que el software desarrollado para la binarización de la imagen, utilizando un sistema embebido, permite procesar una imagen de baja resolución (480x640) en

un tiempo adecuado para su utilización en el sistema de control (11.70ms), validando de esta manera la posibilidad de usar el hardware seleccionado para una aplicación control de actitud angular.

Se ha podido determinar la importancia práctica de la persistencia de imágenes de elevada luminosidad como las que se generan enfocando directamente al sol, por lo que en futuros desarrollos se deberá diseñar, construir y ensayar algún elemento o dispositivo inhibidor solar (basado –por ejemplo– en fotodiodos).

En la futura evolución del proyecto, se planea utilizar una maqueta de la carga útil, con un sistema de eyección de gas similar a los utilizados en vuelo, montada sobre una mesa con rodamiento de aire de un grado de libertad, en la que se instalará el hardware y la cámara discutidos en este trabajo para realizar simulaciones semi-reales a fin de verificar el funcionamiento del conjunto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las autoridades de las Facultades Regionales La Rioja y Córdoba y al Centro de Investigaciones Aplicadas (CIA) de la Fuerza Aérea Argentina por el apoyo recibido, como asimismo reconocer el asesoramiento y la colaboración de los Ings. Juan P. Pedroni (director), Juan J. Gaspanello (becario graduado) y del Sr. Luis G. Hintz (becario alumno), también integrantes del equipo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Makovec K.L. (2001). A Nonlinear Magnetic Controller for Three-Axis Stability of Nanosatellites. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, July 2001.
- [2] Makovec K.L., Turner A.J., Hall C.D., (2001). "Design and Implementation of a Nanosatellite Attitude Determination and Control System". *Advances in the Astronautical Sciences, Astrodynamics 2001*. Vol 109, Part I: 167-186.
- [3] Meller D., Sripruetkiat P., Makovec K.L., (2000). "Digital CMOS Cameras for Attitude Determination". 14th AIAA/USU Conference on Small Satellites. Enlace <http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2000/AI12000>
- [4] Cova W.J.D., González G.J., Pedroni J.P., Turra D.N., (2016). "Cámaras Digitales como Sensores de Actitud – Formulación de Requerimientos". X Jornadas de Ciencia, Tecnología y Arte Científico. Univ. Nac. de La Rioja – Ciudad de La Rioja, 31/10 al 3/11 2016.
- [5] Hintz L.G., Oviedo Codigoni C., Zimmermann Y.E., Cova W.J.D., Pedroni J.P., (2016). "Cámaras Digitales de bajo costo como Sensores de Actitud en Aplicaciones Suborbitales". AAECA 2016 – 25º Congreso Argentino de Control Automático. Buenos Aires, Argentina, 1 al 3/11/2016.
- [6] NASA National Aeronautics and Space Administration, imágenes públicas disponibles en www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/