

Dinámica de Vehículos Espaciales

Tema 1: Introducción a la Dinámica y Control de la Actitud y al Sistema de Control y Estimación de actitud

Rafael Vázquez Valenzuela

Departamento de Ingeniería Aeroespacial
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla rvazquez1@us.es

23 de febrero de 2017



Introducción I

- La mayor parte de los vehículos espaciales tienen instrumentos o antenas que deben apuntar en una dirección. Por ejemplo:
 - Telescopios espaciales (Hubble).
 - Los satélites de comunicación deben orientar sus antenas.
 - Los paneles solares deben maximizar su exposición al Sol.
 - Las cámaras de fotografía deben apuntar a una localización.
 - Los radiadores deben estar orientados al espacio profundo.
 - Las toberas propulsivas de un vehículo espacial deben estar correctamente alineadas.
 - Otros instrumentos o sensores científicos.
- Además existen otro tipo de requisitos:
 - Telescopios espaciales (Hubble).
 - Seguimiento de objetivos.
 - Direcciones prohibidas (p.ej. la dirección del Sol para óptica sensible).
- La **orientación** de un vehículo espacial (respecto a otro sistema de referencia de interés, p.ej. inercial o los ejes órbita) se denomina **actitud**.

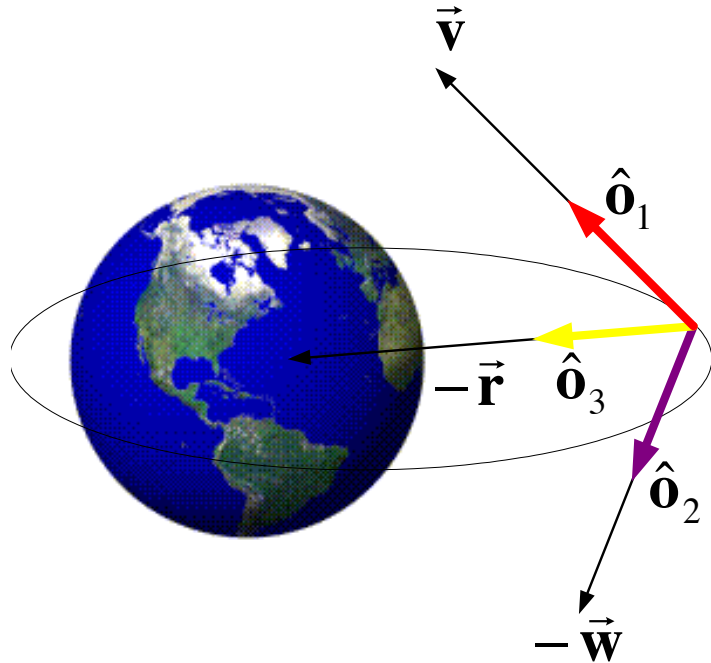


Introducción II

- El subsistema encargado de **conocer y controlar** la actitud, es el Sistema de Determinación y Control de Actitud, en inglés ADCS (Attitude Determination and Control System) cuyas funciones básicas son:
 - Determinar la actitud actual o instantánea, a partir de las medidas de los sensores y el conocimiento de la actitud previo (**problema de estimación**).
 - Emplear los actuadores disponibles para estabilizar la actitud y corregir posibles desviaciones respecto a una actitud deseada (**problema de control**).
- Otras funciones posibles:
 - Generar maniobras de actitud, por ejemplo, para pasar de una actitud inicial a una final deseada (**problema de transferencia de actitud**)
 - Seguir un objetivo (**problema de seguimiento o tracking**).



Representación y Cinemática de la Actitud



- Bajo la hipótesis de sólido rígido, la actitud queda determinada especificando la orientación de los ejes cuerpo respecto a otros ejes de interés.
- Por ejemplo, los ejes órbita tal como se muestra en la figura, cuya definición depende de la órbita concreta.
- La relación entre dos sistemas de referencia se puede representar de varias formas, usando matrices, ángulos de Euler u otros objetos matemáticos.
- La **cinemática de la actitud** son un conjunto de relaciones (en forma de ecuaciones diferenciales) entre la velocidad angular del vehículo, $\vec{\omega}$, y su actitud, representada mediante cualquiera de los métodos que se verán.

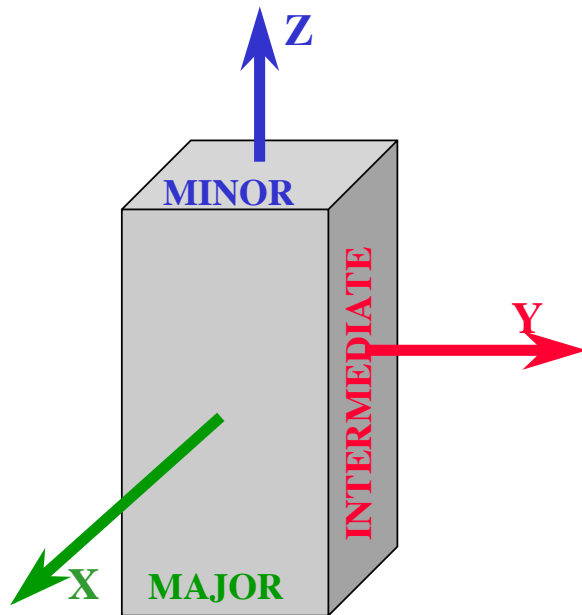


Dinámica de la Actitud

- La **dinámica de la actitud** relaciona la velocidad angular del vehículo con los momentos de las fuerzas que actúan en él, y se basa en el teorema del momento cinético; las ecuaciones diferenciales resultantes se denominan **Ecuaciones de Euler**.
- El movimiento de un sólido en rotación libre (sin momentos) es la solución más simple de estas ecuaciones (analítica en el caso axilsimétrico); se trata de una precesión del eje de rotación alrededor de un eje fijo.
- Un sólido que se encuentra en rotación y se somete a un momento constante no reacciona de una forma “intuitiva” sino que sufre perturbaciones en su rotación inicial, provocándose movimientos de precesión y nutación.
- Esta resistencia a momentos perturbadores se denomina **rigidez giroscópica**. Es la base de funcionamiento de las peonzas.



Estabilidad de sólidos en rotación



- Para el sólido de la figura, $I_1 = I_x$, $I_2 = I_y$, $I_3 = I_z$ son los momentos principales de inercia (dada la forma del sólido). Además $I_1 > I_2 > I_3$ por las dimensiones aparentes en la figura, luego el eje x es el eje mayor de inercia, el y el eje intermedio, y el z el eje menor de inercia.
- Se demuestra que si el sólido rota alrededor del eje mayor o del eje menor, estas rotaciones son estables (realmente son neutralmente estables: cuando la rotación es perturbada, la perturbación no crece).
- Sin embargo si la rotación es alrededor del eje intermedio, dicha rotación es inestable (una perturbación se amplificaría y el eje instantáneo de rotación se alejaría del eje intermedio).
- Estos resultados cambian en presencia de disipación de energía (que siempre existe): **El eje menor es inestable si existe disipación de energía** (Regla del Eje Mayor).



Sputnik vs. Explorer I



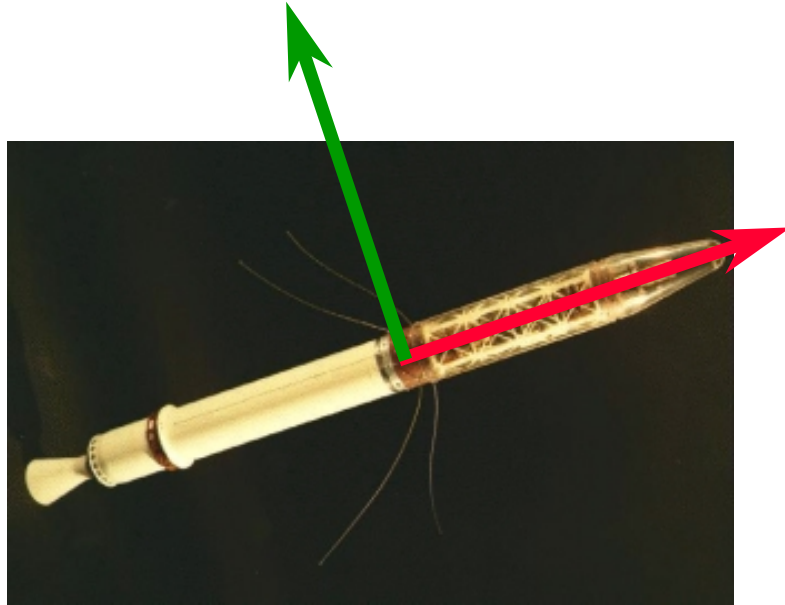
- El Sputnik fue lanzado en 1957
- El satélite estaba estabilizado por rotación en torno a su eje mayor.
- Los ingenieros de la NASA no eran conscientes de este hecho, ni de la regla del eje mayor (que no se puede deducir con un modelo de sólido rígido).



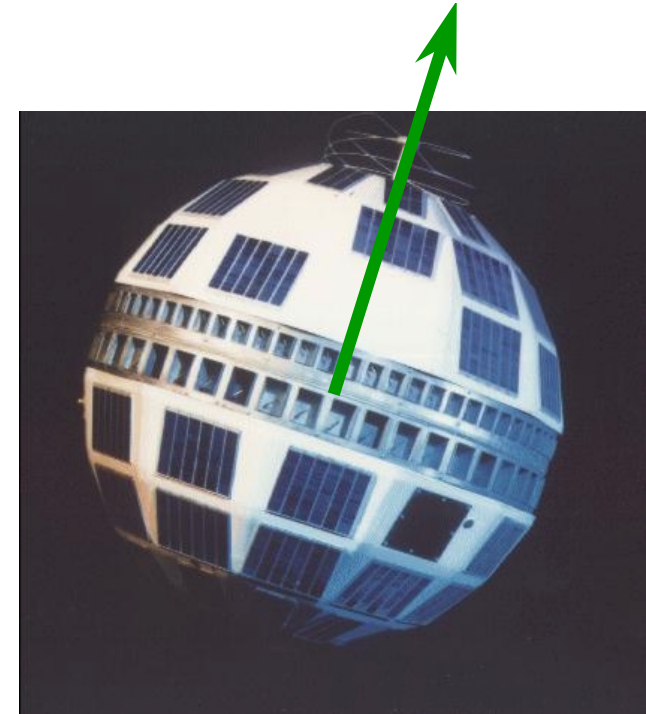
- El Explorer I fue lanzado en 1958, “estabilizado” por rotación en torno a su eje menor.



Sputnik vs. Explorer II



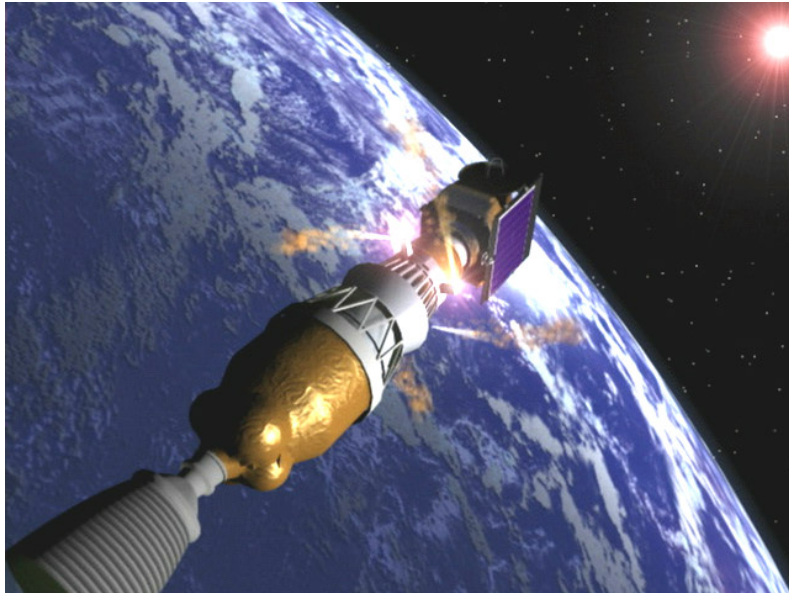
- La estabilización en torno al eje menor (rojo) no funcionó.
- En pocas horas el Explorer 1 empezó a girar en torno a su eje mayor (verde) con un movimiento bastante caótico, imposibilitando su misión.



- El Telstar I (el primer satélite de comunicaciones) fue lanzado en 1962.
- Estaba estabilizado por rotación en torno a su eje mayor, girando a 200 RPM.



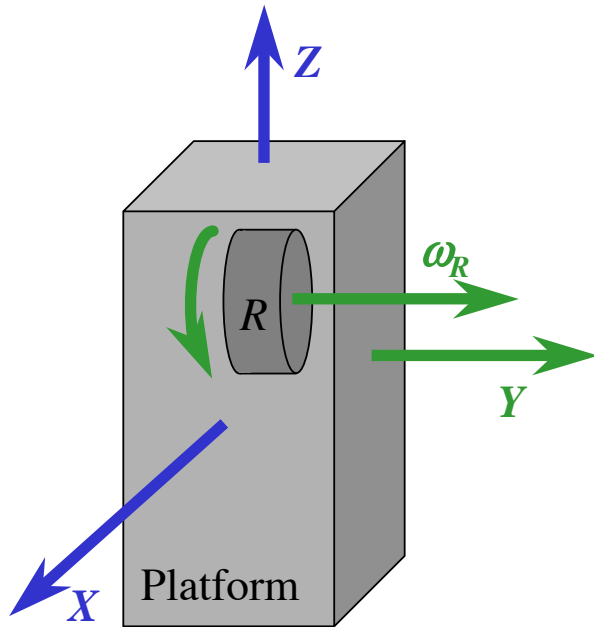
Regla del Eje Mayor: Excepciones



- El eje menor es inestable, pero el tiempo característico de la inestabilidad es lento (horas).
- Típicamente se estabiliza por rotación en torno al eje menor en las últimas etapas de los vehículos lanzadores, antes de encender dichas etapas.
- Esta rotación causa rigidez giroscópica, que disminuye mucho los errores causados por una alineación no perfecta entre la dirección deseada de propulsión y la fuerza propulsiva real.
- Tras el encendido, dicha rotación se detiene, por ejemplo con un mecanismo yo-yo, o se permite que la propia dinámica la transfiera a una rotación en torno al eje mayor.
- Ejemplo: Mars Odyssey.



Efecto de una rueda en la dinámica rotacional



- Una rueda, volante de inercia o rotor situada en el interior o exterior del vehículo y que se encuentre en rotación, produce un efecto de estabilización al proporcionar rigidez giroscópica al conjunto.
- Además, con una rueda se puede estabilizar el eje intermedio, o el menor, incluso en presencia de disipación de energía.
- Además se pueden provocar rotaciones (maniobras) por reacción: si la rueda se acelera en un sentido, en ausencia de momentos externos el vehículo ha de girar en sentido contrario debido a que el momento cinético total no puede cambiar.
- El ejemplo más extremo de este principio es un CMG (giróscopo de control de momentos); consiste en una rueda de alta inercia y gran velocidad fija pero ejes móviles.



Ejemplos de Vehículos Espaciales con volantes de inercia



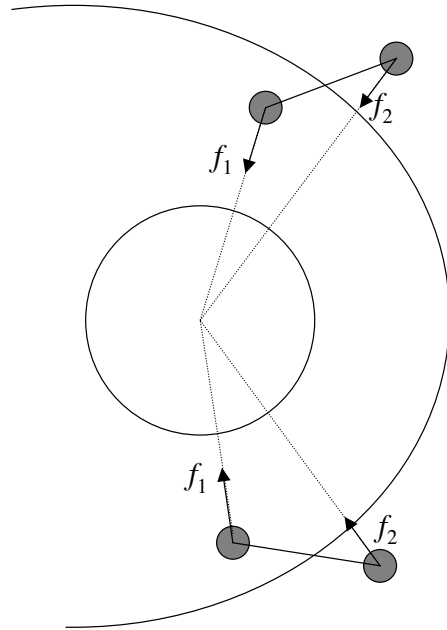
- Satélite Navstar (GPS).
- 4 volantes de inercia girando a varias miles de RPM.
- Sistema auxiliar: RCS (hidrazina).



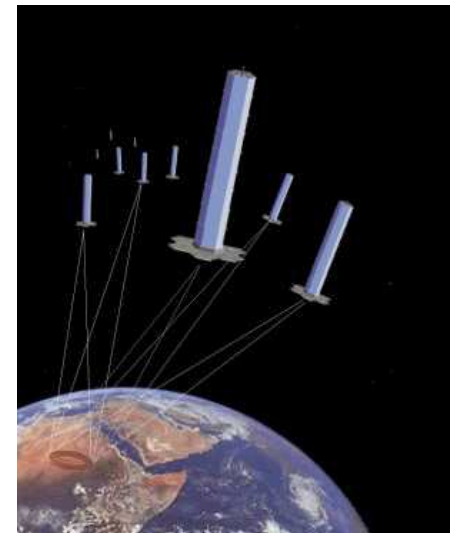
- Satélites DSP (Defense Support Program), son parte del sistema de alerta temprana de USA. Posee sensores infrarojos.
- Estabilizado por rotación con un volante de inercia.



Gradiente gravitatorio (G^2)



- La forma y distribución másica no esférica de un vehículo espacial lo somete al llamado momento gravitatorio, mientras circula en su órbita, ya que $F = \mu m / r^2$.
- Por tanto existe una “fuerza restauradora”, que tiende a hacer girar al vehículo como un péndulo, en torno a su posición de equilibrio.
- El “ G^2 ” se puede aprovechar para estabilización; no obstante apenas proporciona estabilidad en guiñada. Por ello a veces se combina con un volante de inercia.
- La Luna está “estabilizada” por G^2 .
- El satélite Polar BEAR, estabilizado por gravedad, invirtió su posición de equilibrio.



TechSat 21

Sistemas estabilizados en tres ejes

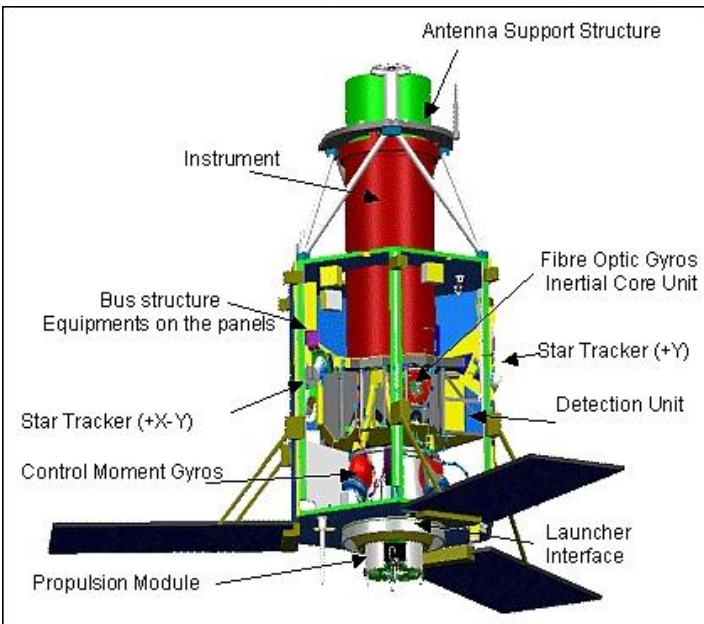
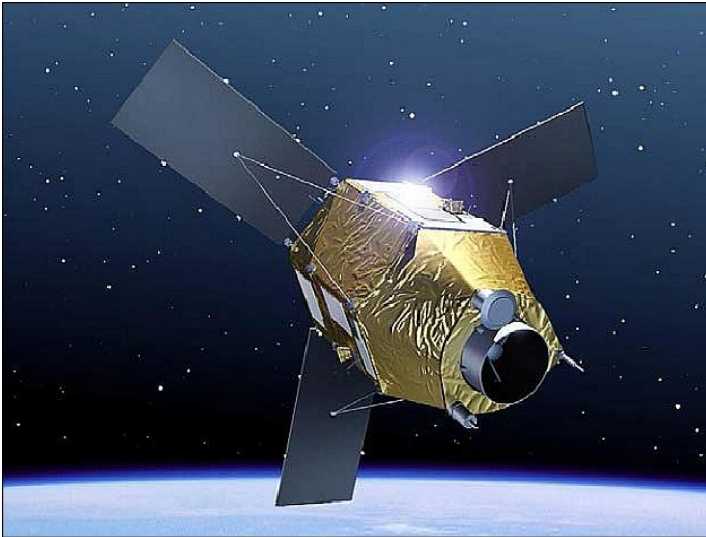
- Los satélites que tienen un sistema ADCS que controla totalmente su actitud se denominan estabilizados en tres ejes.



- Por ejemplo, el sistema de control de actitud del telescopio Hubble es uno de los sistemas más precisos jamás contruidos por el hombre.
- El telescopio principal tiene que ser capaz de mantener su posición respecto a un blanco con una precisión de 0.007 segundos de arco (el ancho de un cabello humano visto a 1.5 km de distancia).
- Un golfista con esa precisión (y la fuerza necesaria) sería capaz de realizar un “hoyo en uno” en un campo de golf en Málaga efectuando la salida desde Moscú, 19 de cada 20 veces!
- El Hubble realiza su control de actitud en tres ejes empleando ruedas de reacción y volantes de inercia.



Satélites ágiles



- Los satélites de observación de la Tierra tienen requisitos importantes de control de actitud.
- Los llamados “satélites ágiles” están preparados para adquirir múltiples imágenes o incluso 3D (tomadas dos veces desde ángulos distintos).
- Por ejemplo la constelación Pleiades (2 satélites del CNES, agencia espacial francesa) tiene capacidad de obtener imágenes con resolución < 1 m. en cualquier punto de la Tierra!
- Para sacar partido a la óptica es necesaria una enorme precisión en el control/determinación de actitud, pero también velocidad en las maniobras; esto se consigue con los CMG (control moment gyros), star trackers y FOG de alta resolución.

