Dinámica de Vehículos Espaciales

Tema 7: Sistemas de control de actitud pasivos.

Rafael Vázquez Valenzuela

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

24 de mayo de 2016

Control de actitud

- El sistema de control de actitud de los satélites se puede dividir a muy grandes rasgos en dos grandes tipos:
  - Satélites estabilizados por rotación: se aprovechan del efecto giroscópico para mantener una dirección inercialmente fija. Más barato y sencillo.
  - Satélites estabilizados en los tres ejes: utilizan algún mecanismo de control activo para mantener su actitud fija respecto a alguna referencia.
- Muchos satélites pueden usar los dos modos, según la fase de la misión (particularmente sondas interplanetarias).
- También se pueden estabilizar satélites utilizando el gradiente gravitatorio (no require control activo de ningún tipo, pero es poco preciso), o mediante algún sistema de rotación doble (esencialmente similares a los estabilizados por rotación). En las siguientes transparencias veremos los tipos de estabilización comúnmente empleados.

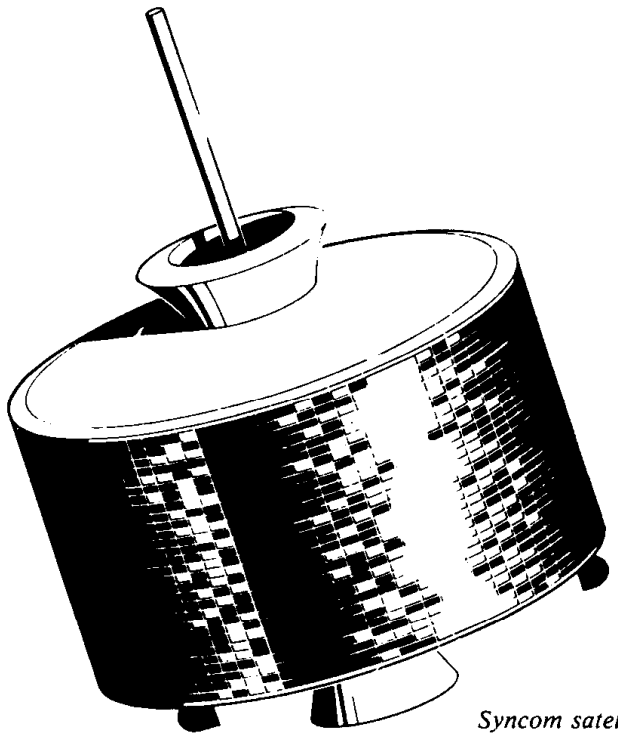
Métodos de control de actitud

- Otra clasificación de los métodos de control de actitud en dos clases: control activo y control pasivo.
- No obstante, la palabra pasivo tiene, en teoría de control, varias interpretaciones.
  - Control pasivo en el sentido energético: un sistema de control que no requiere ningún tipo de fuente de energía adicional para su funcionamiento.
  - Pasivo en el sentido estructural: un sistema de control que carece de lógica de comando, es decir, no necesita ningún tipo de procesado de información para su actuación, puesto que aprovecha algún tipo de efecto físico o natural.
  - Además, existe el concepto de "Sistema Pasivo", una definición matemática utilizada en control no lineal.
- Ésto no se debe confundir con la distinción entre Bucle Abierto y Bucle Cerrado.
- Los sistemas que denominaremos de Control Pasivo no lo son estrictamente, sino que en general incorporan algún elemento activo complementario.

Sistemas de control pasivos

- Los sistemas de Control Pasivo tipicamente encontrados en vehículos espaciales son los siguientes:
  - Estabilización por rotación (spin stabilized systems).
  - Estabilización por rotación doble (dual-spin stabilized systems).
  - Estabilización por gradiente gravitatorio (G^2).
  - Estabilización por volante de inercia (bias-momentum stabilized systems). Éste método también se puede considerar activo.
  - Estabilización por momentos magnéticos. Éste método también se puede considerar activo.

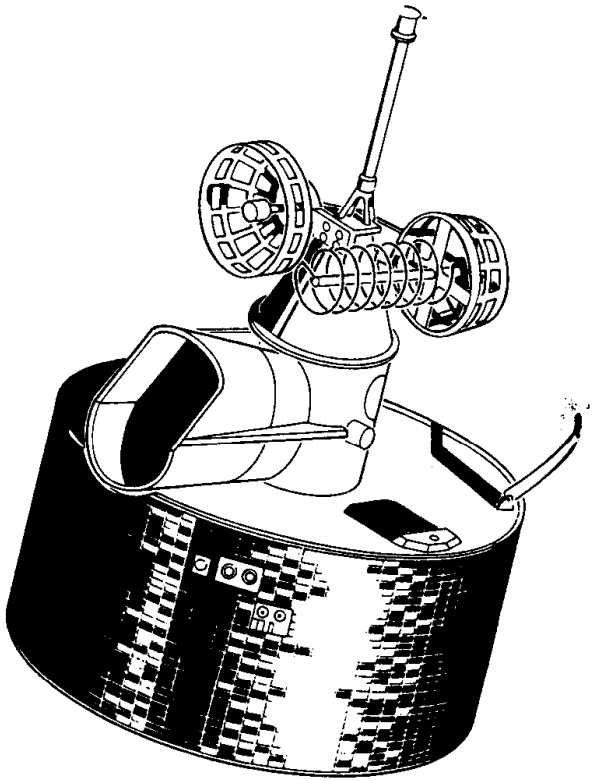
Estabilización por rotación



Syncom satellite.

- Estabilización por rotación: Sistema simple y económico para estabilizar la actitud.
- Si el sistema es puramente pasivo, el eje de rotación debe ser el eje mayor.
- Típico en vehículos con simetría de revolución, que deben ser oblatos y no prolatos.
- Las perturbaciones provocarán un movimiento de nutación del eje de rotación, que puede ser eliminado mediante amortiguadores de nutación.
- Para acelerar o frenar la rotación se emplean propulsores o (para frenar) sistemas yo-yo.
- Los propulsores también se pueden emplear para re-orientar el eje de rotación (coning o "coneo").

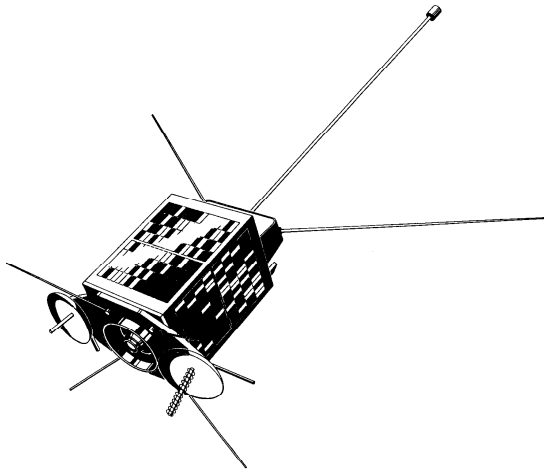
Estabilización por rotación doble



GOES satellite.

- Estabilización por rotación doble: Cuando se requiere mayor precisión de actitud o por requisitos de lanzamiento el vehículo no puede ser oblato, se recurre al sistema de estabilización de rotación doble.
- Una parte del vehículo (rotor) gira a una cierta velocidad, mientras que otra parte del vehículo (plataforma o estator) no gira o rota muy despacio.
- En la plataforma se suelen ubicar instrumentos de medida.
- Si el rotor adquiere el suficiente momento cinético, la rotación puede ser alrededor del eje menor o incluso el intermedio, permitiendo mayor libertad en la forma del vehículo y mejorando la maniobrabilidad.

Estabilización mediante gradiente gravitatorio



- El G^2 puede ser utilizado para estabilizar de forma simple y barata, de forma que siempre se apunte a un cuerpo central y la órbita sea casi-circular.
- Es un mecanismo lento y poco preciso, requiere elementos disipadores.
- Proporciona baja maniobrabilidad y poca estabilidad en guiñada.

- El gradiente gravitatorio tiende a alinear el eje menor con la vertical local, el eje intermedio con la dirección de la órbita y el eje mayor perpendicular al plano de la órbita, lo que debe ser considerado en el diseño.

Eole satellite.

Estabilización mediante gradiente gravitatorio

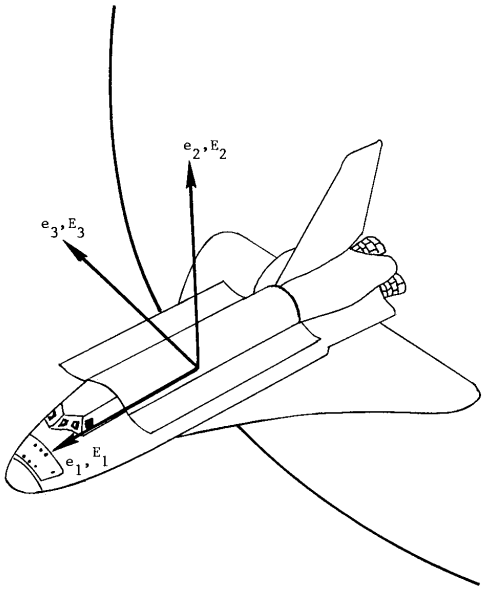


Figure 7.9 Space Shuttle body axes.

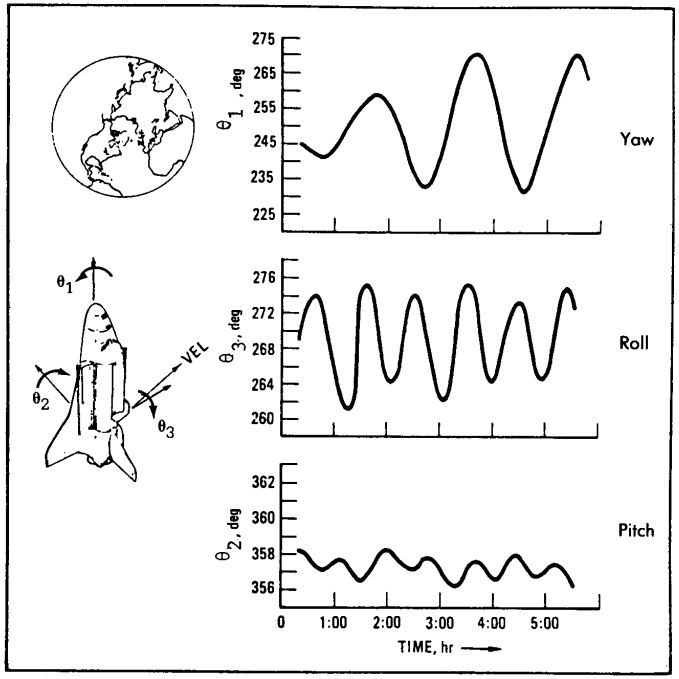
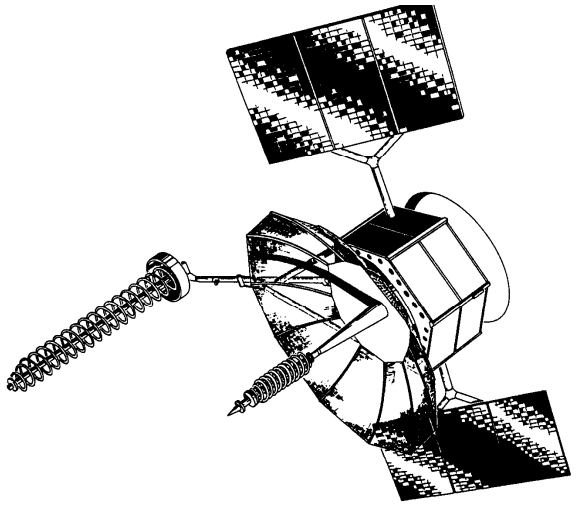


Figure 7.10 Space Shuttle attitude excursions in gravity gradient mode in an orbital coordinate frame.

- El G^2 en algunos casos es un mecanismo secundario, para ahorrar combustible en los momentos en los que no es crítico una actitud precisa.
- Los satélites de más larga vida incorporan este tipo de estabilización.

Estabilización con volante de inercia

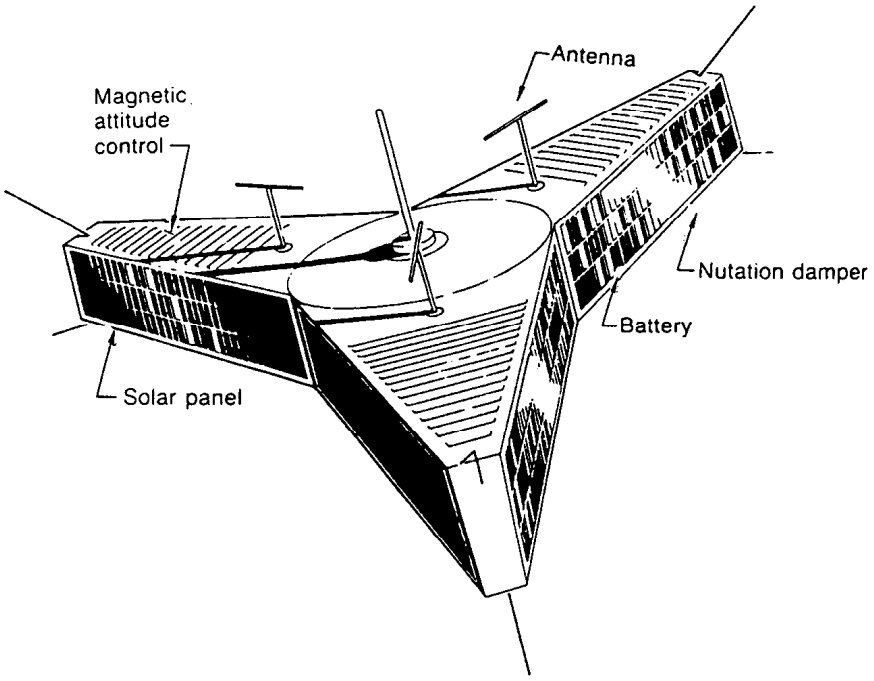


FLTSATCOM satellite.

- El mismo concepto de los sistemas de rotación doble se puede incorporar a un vehículo espacial con una rueda interna (volante de inercia) rotando a una cierta velocidad base, eliminando así la necesidad de elementos externos rotatorios.

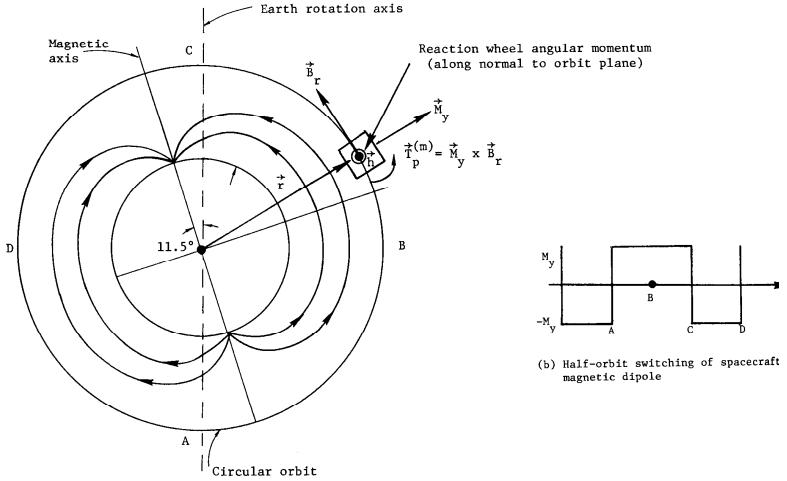
- Además se puede emplear como parte de un sistema de control activo.
- El volante de inercia se suele colocar con el eje perpendicular al plano orbital, combinándose con el G^2.
- Para realizar maniobras en el plano orbital, si se acelera o frena el volante, provoca que el vehículo rote en la dirección opuesta, por conservación del momento cinético.

Estabilización por momentos magnéticos



- Usando magnetopares, se puede aprovechar el campo magnético de la Tierra para orientar un vehículo mediante las fuerzas de Lorenz.

- Sólo útil en órbita baja de planetas con campo magnético de suficiente intensidad.
- Puesto que el campo magnético de la Tierra siempre apunta hacia el Norte, se debe cambiar la polaridad de los actuadores cada media órbita.



Control de un satélite estabilizado por rotación

- Por la regla del eje mayor sabemos que un satélite rotando en torno a su eje mayor es estable; además hemos estudiado que su respuesta a perturbaciones externas es un movimiento de precesión y nutación, que terminará disipándose.
- Los objetivos de un sistema de control para un satélite estabilizado por rotación pueden ser:
  - Iniciar o incrementar la rotación.
  - Aumentar la estabilidad de la rotación.
  - Modificar la dirección del eje de rotación.
  - Frenar la rotación.
- El primer objetivo es trivial de conseguir con toberas propulsivas, aunque muchas veces los satélites empiezan con una cierta rotación que ya poseía el vehículo lanzador (tal vez en el eje equivocado).
- El segundo objetivo se puede conseguir con disipadores de nutación, que aumentan la disipación de energía y por tanto refuerzan la regla del eje mayor (ver tema 6).

Modificar el eje de rotación

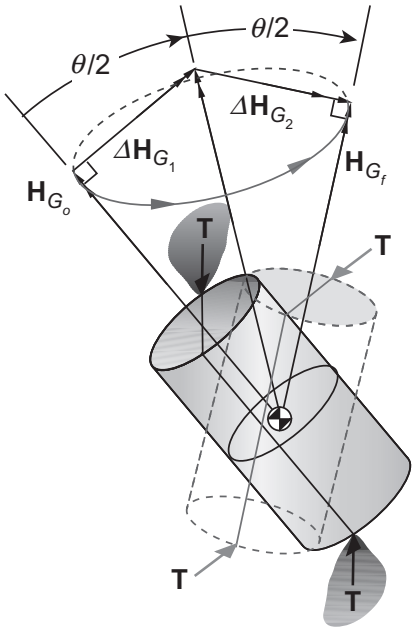
- Una forma de modificar el eje de rotación sería frenar dicha rotación, entonces modificar el eje con otra rotación, y posteriormente volver a hacer rotar el eje. No obstante este procedimiento sería lento y caro en términos de gasto de combustible. Veamos otro procedimiento, la llamada maniobra de "coning".
- Para simplificar nos centramos en el caso axisimétrico ($I_1 = I_2 = I < I_3$) y consideramos que podemos realizar maniobras impulsivas: podemos modificar el momento cinético instantáneamente en un $\Delta\Gamma$ usando toberas.
- Inicialmente, sea una rotación pura n en torno al eje 3 (eje de simetría y mayor), de forma que $\vec{\omega}$ y $\vec{\Gamma}$ están alineados.
- Recordemos el estudio del movimiento forzado (efecto giroscópico): sabemos que si aplicamos un par perpendicular al eje 3, se produce un movimiento de precesión y nutación.

Modificar el eje de rotación

- Para simplificar, vamos a suponer, en vez de usar el movimiento forzado, que podemos modificar "instantáneamente" $\vec{\Gamma}$, con impulsos casi instantáneos, de forma que $\vec{\Gamma}_f = \vec{\Gamma}_i + \Delta\vec{\Gamma}$
- En el tema 6 estudiamos que el movimiento libre de un satélite axisimétrico rotando en torno a su eje de simetría era un movimiento de precesión, de forma que la velocidad ángular $\vec{\omega}$ rota formando un cono en torno al momento cinético $\vec{\Gamma}$.
- Por tanto con la hipótesis de cambio de momento cinético instantáneo eliminamos el movimiento de nutación, que complica el problema, y podemos usar los resultados exactos del movimiento libre de un sólido axisimétrico.

Coning

- Supongamos que se quiere girar el eje de rotación un ángulo θ.
- La idea es aplicar un $\Delta\vec{\Gamma}$ de forma que el nuevo $\vec{\Gamma}$ forme un ángulo $\theta/2$ con la velocidad angular. Esto causará que la velocidad angular gire en torno al nuevo $\vec{\Gamma}$ formando un cono y cuando haya girado un ángulo de 180 grados habrá girado un ángulo θ respecto a su antigua posición. Entonces se aplica un nuevo $\Delta\vec{\Gamma}$ de forma que el $\vec{\Gamma}$ final sea paralelo a la velocidad angular. En la figura, $\mathbf{H_G} = \vec{\Gamma}$.

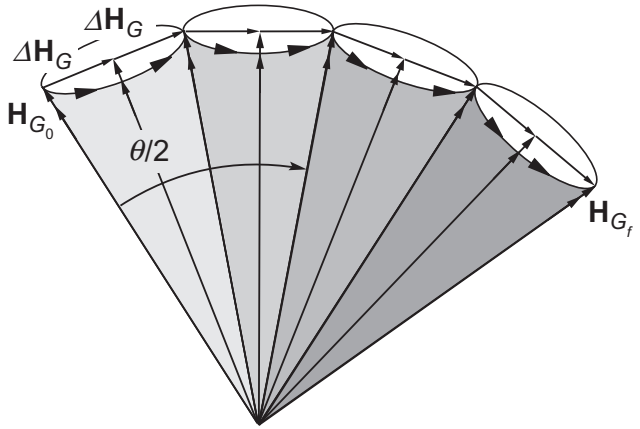


Coning

- De la figura, se ve que $\Delta\Gamma_1 = \Delta\Gamma_2 = \Gamma \tan\theta/2$, luego el total $\Delta\Gamma_{coning} = 2\Gamma \tan\theta/2$. El momento cinético final es igual al inicial (el intermedio es ligeramente mayor: $\frac{\Gamma}{\cos\theta/2}$).
- El tiempo que se tarda en realizar la maniobra será π (media vuelta) dividido por la velocidad angular de precesión: $t = \frac{\pi}{\dot{\phi}}$.
- Como del tema 6 se tiene $\dot{\phi} = \frac{I_3 n}{I\cos\theta/2} = \frac{\Gamma}{I\cos\theta/2}$, se tiene $t = \frac{\pi I\cos\theta/2}{\Gamma}$.
- Por otro lado durante ese tiempo el cuerpo habrá rotado respecto a su eje de simetría, en ejes cuerpo (ver tema 6), un ángulo $\psi = t\lambda = \frac{\pi I\cos\theta/2}{\Gamma}\frac{n(I-I_3)}{I} = \frac{\pi(I-I_3)\cos\theta/2}{I_3}$.
- En general este ángulo no será 180 grados (a menos que $\frac{(I-I_3)\cos\theta/2}{I_3} = 1$) luego habrá que usar un par de toberas distintas a las que se usaron para empezar la maniobra.

Coning múltiple

- Una idea para reducir el consumo de combustible (o para ángulos de giro demasiado grandes) es dividir la maniobra de coning en m pequeñas maniobras intermedias, como se ve en la figura:



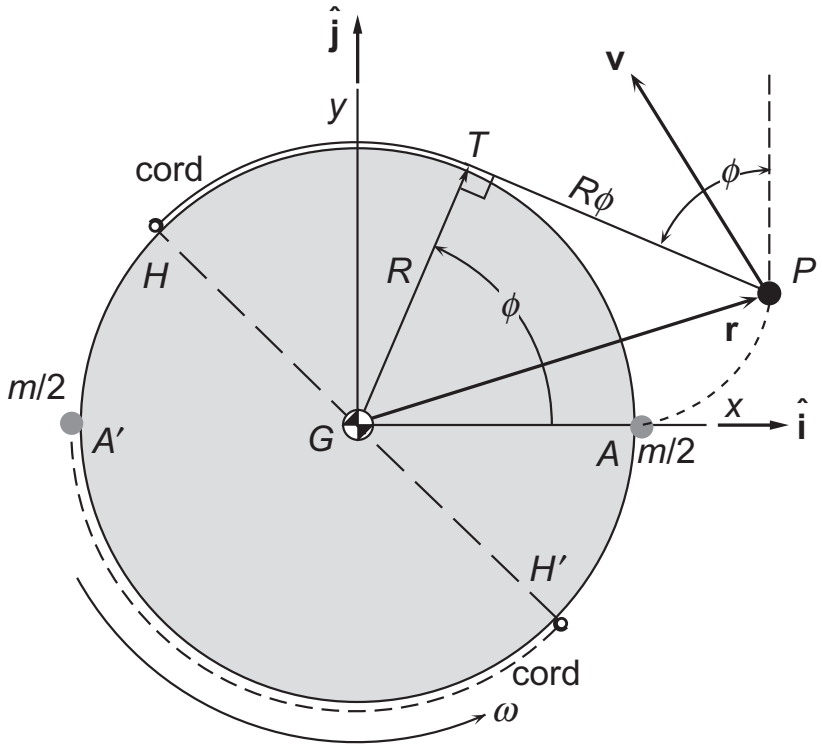
- En cada maniobra hay que rotar Γ un ángulo $\theta/2m$ y esperar un giro de 180 grados.
- El consumo total será $\Delta\Gamma_{coning} = 2m\Gamma \tan \theta/2m$ (si m es grande tiende a $\theta\Gamma$, merece la pena para ángulos grandes).
- El tiempo de maniobra será $t = \frac{m\pi I \cos \theta/2m}{\Gamma}$ (si m es grande tiende a infinito).

Frenar la rotación: mecanismo yo-yo

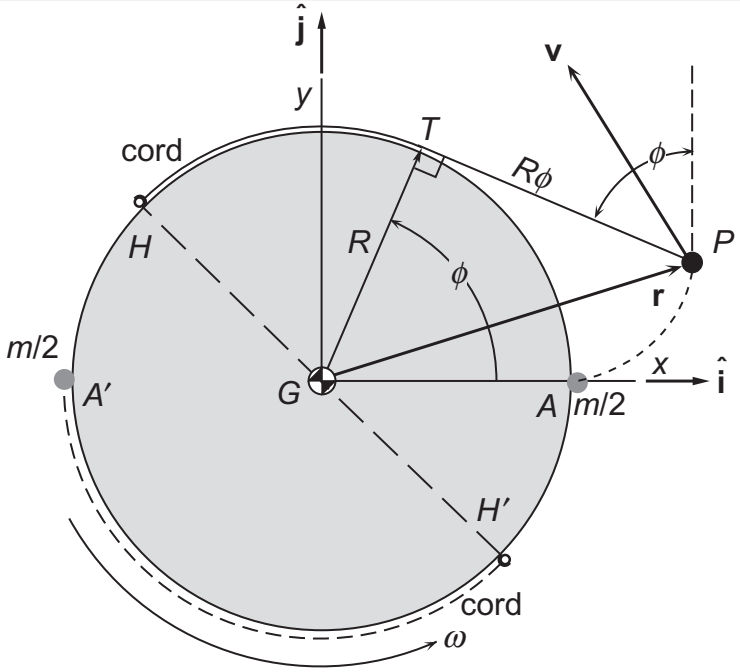
- El mecanismo yo-yo es un dispositivo de un único uso que se emplea para frenar total o parcialmente la rotación de un vehículo. El mecanismo consiste en dos masas simétricas fijadas al vehículo por una unión que se puede liberar, y a su vez unidas a un hilo que está fijado en otro punto al vehículo. Todo esto en un plano perpendicular a la rotación que se pretende frenar.
- Para frenar la rotación, se liberan las masas; éstas se empiezan a separar del vehículo y el hilo comienza a tensarse, hasta que se tensa en el punto donde está fijado en el vehícuo y entonces también se libera el hilo. Si la longitud del hilo está bien diseñada, en este punto se habrá frenado el vehículo.
- Hipótesis: las masas se consideran puntuales de masa $m/2$, el hilo no tiene masa y no es flexible, vehículo axilisimétrico de radio R rotando inicialmente en su eje de simetría con velocidad n_0.

Mecanismo yo-yo

- Inicialmente, la energía cinética es $T_0 = \frac{1}{2}\left(I_3 n_0^2 + mR^2 n_0^2\right)$ y el momento cinético inicial $\Gamma_0 = I_3 n_0 + mR^2 n_0$. Usando el parámetro $K = 1 + \frac{I_3}{mR^2}$, podemos escribir $T_0 = \frac{1}{2} mR^2 K n_0^2$ y $\Gamma_0 = mR^2 K n_0$.
- La situación en un momento intermedio es la de la figura:



Mecanismo yo-yo



- Para frenar la rotación, se liberan las masas; éstas se empiezan a separar del vehículo y el hilo comienza a tensarse, hasta que se tensa en el punto donde está fijado en el vehícuo y entonces también se libera el hilo. Si la longitud del hilo está bien diseñada, en este punto se habrá frenado el vehículo.
- Hipótesis: las masas se consideran puntuales, el hilo no tiene masa y no es flexible, vehículo axilisimétrico rotando inicialmente en su eje de simetría con velocidad n_0.

Mecanismo yo-yo

- En la figura, el hilo se ha soltado ya un ángulo ϕ, y el vector $\vec{r}$ es el vector de posición de una de las masas (la otra tiene una posición simétrica, por lo que basta estudiar una de ellas). Por las hipótesis el hilo estará tangente justo en el punto T hasta donde se ha soltado. Usamos unos ejes móviles con el cuerpo $\vec{i}$ y $\vec{j}$ como en la figura.
- En estos ejes, $\vec{r}$ se escribirá como la suma $\vec{r} = \vec{GT} + \vec{TP} = R(\cos\phi\vec{i} + \operatorname{sen}\phi\vec{j}) + R\phi(\operatorname{sen}\phi\vec{i} - \cos\phi\vec{j})$.
- Para hallar la energía cinética y el momento cinético en este estado intermedio necesitamos la velocidad (inercial). Se tiene

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}}|_{IN} = \dot{\vec{r}}|_{ROT} + \vec{\omega} \times \vec{r}$$

  donde $\vec{\omega} = n\vec{k}$.
- Operando, $\dot{\vec{r}}|_{ROT} = \dot{\phi}R\phi(\cos\phi\vec{i} + \operatorname{sen}\phi\vec{j})$ y $\vec{\omega} \times \vec{r} = nR(\cos\phi\vec{j} - \operatorname{sen}\phi\vec{i}) + nR\phi(\operatorname{sen}\phi\vec{j} + \cos\phi\vec{i})$.

Mecanismo yo-yo

- Por tanto
  $\vec{v} = R\left((\dot{\phi}+n)\phi\cos\phi - n\,\mathrm{sen}\,\phi\right)\vec{i} + R\left((\dot{\phi}+n)\phi\,\mathrm{sen}\,\phi + n\cos\phi\right)\vec{j}.$
- Calculando el módulo de la velocidad:
  $v = R\sqrt{\left((\dot{\phi}+n)\phi\cos\phi - n\,\mathrm{sen}\,\phi\right)^2 + \left((\dot{\phi}+n)\phi\,\mathrm{sen}\,\phi + n\cos\phi\right)^2}.$
- Operando: $v = R\sqrt{(\dot{\phi}+n)^2\phi^2 + n^2}$.
- Por tanto, $T = \frac{1}{2}\left(I_3 n^2 + mR^2((\dot{\phi}+n)^2\phi^2 + n^2)\right)$ y usando el parámetro K, $T = \frac{mR^2}{2}\left(Kn^2 + (\dot{\phi}+n)^2\phi^2\right)$.
- Por otro lado el momento cinético de las masas será $\Gamma_m = |\vec{r}\times m\vec{v}|$. Efectuando este producto hallamos $\Gamma_m = mR^2(n + (n+\dot{\phi})\phi^2)$.
- Luego $\Gamma = I_3 n + mR^2(n + (n+\dot{\phi})\phi^2) = mR^2(Kn + (n+\dot{\phi})\phi^2)$.

Mecanismo yo-yo

- Aplicando conservación del momento cinético y conservación de la energía: $T = T_0$, $\Gamma = \Gamma_0$, llegamos a dos ecuaciones:

$$K(n_0^2 - n^2) = (\dot{\phi} + n)^2\phi^2, \quad K(n_0 - n) = (n + \dot{\phi})\phi^2$$

- Dividiendo la primera por la segunda, obtenemos $n_0 + n = n + \dot{\phi}$, luego $\dot{\phi} = n_0$, es decir, la tasa de "desenrollamiento" del hilo es igual a la velocidad angular inicial del vehículo durante todo el proceso. Sustituyendo este valor en la segunda ecuación y despejando ϕ, hallamos el ángulo de hilo suelto en función de la velocidad actual:

$$\phi = \sqrt{K\frac{n_0 - n}{n_0 + n}}$$

- Si queremos que al final del proceso $n = 0$, sustituyendo, llegamos a $\phi = \sqrt{K}$, y puesto que la longitud de hilo $l = R\phi$, obtenemos $l = R\sqrt{K}$, independiente de la velocidad inicial!
- Se puede encontrar longitud de hilo apropiada para cualquier valor de $n \in (-n_0, n_0)$.