

SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL

Introducción

Definición: "Navegación Inercial es la navegación basada en instrumentos inerciales: giróscopos, acelerómetros y/o plataformas inerciales"

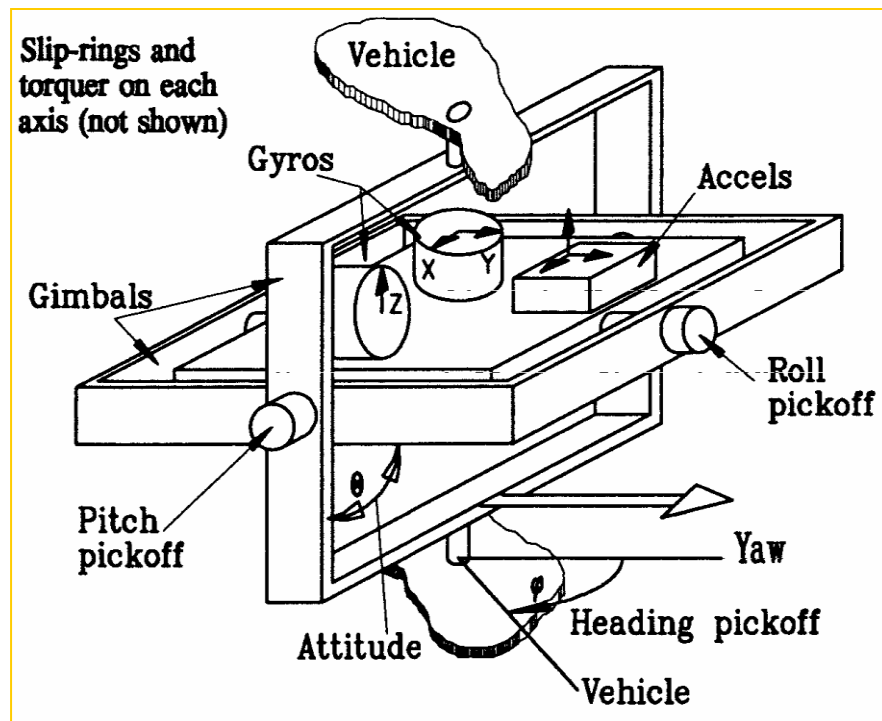
Existen dos Clases:

- Plataforma Inercial. Giroestabilizada.
- Plataforma fija o "strap-down". Instrumentos fijos al vehículo

Plataforma inercial:

Los primeros sistemas de navegación autónoma se remontan a la segunda guerra mundial y las famosas bombas V1 y V2 alemanas, En aquellos días la electrónica era escasa al borde de inexistente y sin embargo disponían de sistemas de guiado que cometían un error pequeño en un viaje de larga distancia. El sistema utilizado se basaba en una plataforma giroestabilizada.

Este sistema consta de una suspensión cardánica de tres ejes denominada Gimbal, en la cual se montan tres giróscopos para su estabilización. La plataforma va fija a la estructura del vehículo. Los ángulos de actitud (respecto de la posición inicial) se miden directamente.



Como en todo dispositivo mecánico, existen fricción y desbalances que aunque mínimos, exigen la utilización de dispositivos de actuadores para compensar los desplazamientos angulares causados por estos efectos.

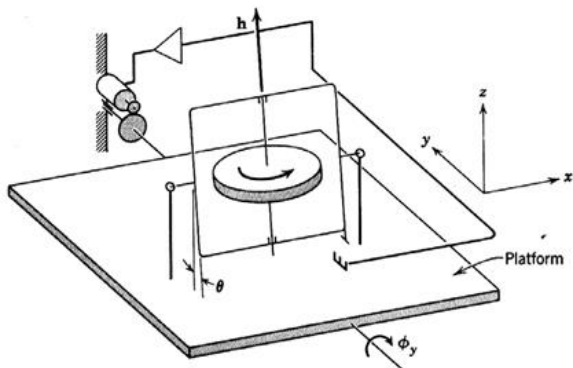


Fig. 6.8-2. Single-axis platform to maintain angular orientation about y axis.

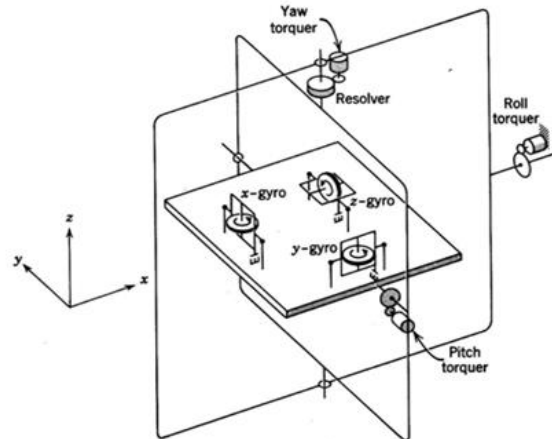
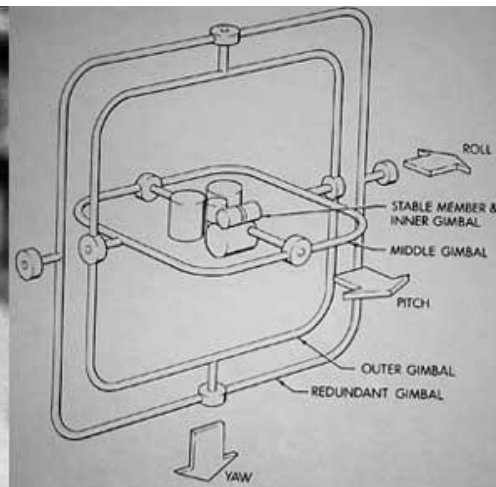
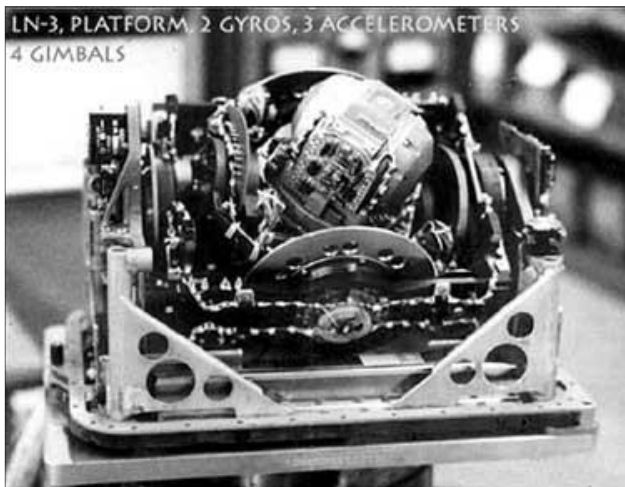


Fig. 6.8-1. Stable platform for inertial guidance.

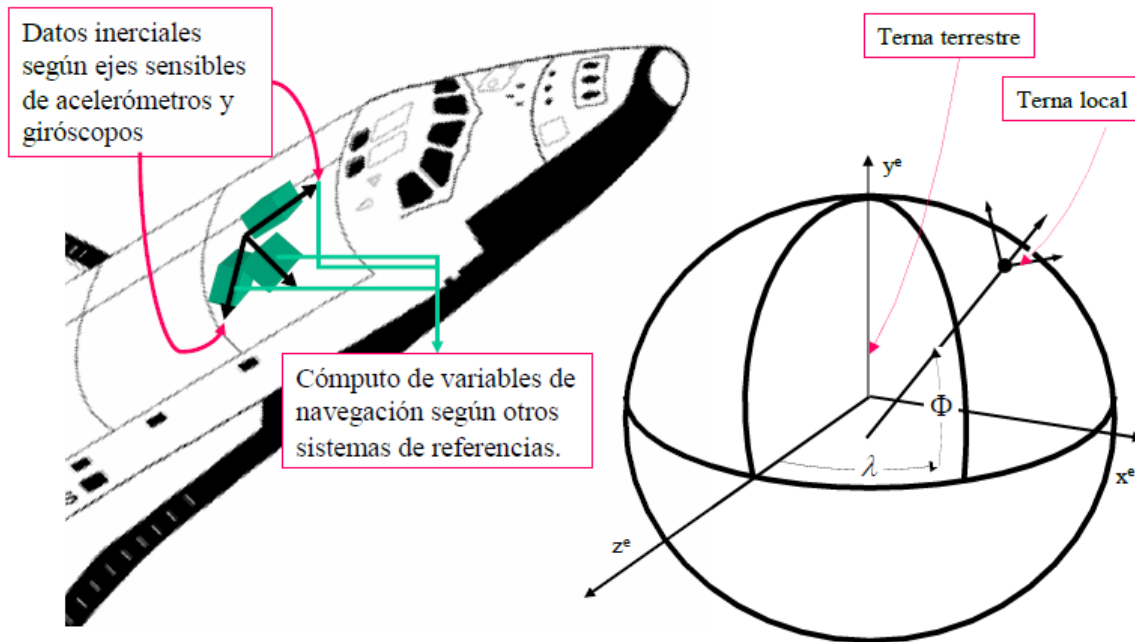


Plataforma Fija o Strap Down

También conocida como plataforma analítica, es un sistema de medición que no posee mecanismos, y se basa en la medición de aceleraciones y velocidades angulares para calcular los parámetros de navegación. Requiere de un grupo de sensores (giróscopos y acelerómetros) y una computadora para realizar los cálculos.

El sistema cuenta con un algoritmo que calcula todas las variables de vuelo:

- Por una parte las referentes a la inclinación de los ejes del avión con respecto a eje de referencia “tierra”, lo que llamaríamos horizonte artificial o más técnicamente AHRS (Attitude and Heading Reference System).
- Por otra parte, el sistema de posicionamiento, posición y velocidad del avión.



Comparación Plataforma analítica vs inercial

Plataforma analítica (Strap Down)

- No requiere plataforma física (gimbal y plataforma analíticas)
- Ocupa menos espacio.
- Requiere alta capacidad de cómputo en tiempo real
- El énfasis en software facilita la miniaturización.
- Instrumentos muy bien calibrados.
- Amplio rango de medición.
- Apto para vehículos sometidos a altas aceleraciones y bruscos cambios de actitud.

Plataforma Inercial

- Simplifica el cómputo de las variables de navegación.
- Requiere de plataforma y lazos de control de compensación.
- Mayor volumen y fragilidad de la unidad de navegación.
- Los instrumentos (en particular los giróscopos) no requieren de mayor calibración ya que son usados como instrumentos de cero.
- Menos flexibilidad y versatilidad para cambiar de sistema de referencia.

A continuación se hará una descripción más en detalle del funcionamiento de una plataforma analítica.

2 Plataforma Analítica o Strap Down

2.1. Tecnología inercial

Un marco de referencia inercial es aquel en el que se verifican las leyes de la física de Newton, a saber, el marco de referencia no está sujeto al efecto de fuerza alguna y por lo tanto su movimiento es rectilíneo uniforme. Un sensor inercial es aquel capaz de medir valores respecto dichos marcos de referencia.

En el contexto tecnológico actual los sensores inerciales utilizados en la determinación de trayectorias, a los cuales nos limitaremos para simplificar la exposición, son de dos tipos: acelerómetros y giróscopos. Los primeros miden aceleraciones lineales y los segundos velocidades de rotación. Son varias las técnicas y los principios físicos que rigen el funcionamiento de estos sensores. En el caso de los giróscopos, por ejemplo, encontramos los denominados DTG (Dinamically Tuned Gyro), ESG (Electrostatically Supported Gyro) y GBG (GAS Bearing Gyro) cuyo funcionamiento se basa en el principio de conservación del momento angular, y los RLG (Ring Laser Gyro) y IFOG (Interferometric Fiber Optic Gyro) basados en el efecto relativista de Sagnac. Como es de suponer las características de funcionamiento y error son diferentes para cada sensor. Para una exposición detallada véase [1,5,7, 11]

Debe observarse en este punto que la materialización explícita de un marco de referencia inercial no es posible en el sentido estricto físico del término. Aun así, las restricciones de las técnicas inerciales actuales permiten olvidar este problema. Actualmente los sensores inerciales son capaces de medir las aceleraciones y velocidades angulares debidas al movimiento de rotación de la tierra sobre ella misma y al campo gravitacional de ésta, pero no las asociadas a la translación de la tierra alrededor del sol. De esta forma un marco de referencia con origen situado en el centro de la tierra y que permanezca en reposo respecto al movimiento de rotación de ésta puede utilizarse como marcos de referencia inercial. Dichos marcos de referencia se implementan tomando como puntos fijos objetos estelares suficientemente alejados del sistema solar como para poder considerar el error debido a su movimiento despreciable. Los marcos de referencia que sustituyen a los inerciales son llamados casi-inerciales y son los utilizados en la implementación de la navegación inercial. En lo que resta de artículo nos ocuparemos siempre de marcos de referencia casi-inerciales, si bien por comodidad, siempre nos referiremos a ellos como a marcos de referencia inerciales.

¿Que es una IMU?

Una unidad inercial o IMU (Inertial Measuring Unit) es un dispositivo que integra tres giróscopos y tres acelerómetros junto con un reloj que permite asignar tiempo a los valores medidos por los sensores inerciales y mecanismos de calibración de dichos sensores a posibles perturbaciones debidas a cambios de temperatura o a otros agentes externos. Este tipo de unidades implementan internamente tres ejes ortogonales sobre los cuales se montan los sensores de manera que a cada eje le es asignado un acelerómetro y un giroscopio. La información suministrada por una IMU es la aceleración lineal y la velocidad angular correspondiente a cada uno de los ejes de un sistema de tres ejes ortogonales con el correspondiente valor de tiempo común para estos seis valores. La frecuencia típica de salida de datos de una unidad inercial oscila, en función de las características de la IMU, entre los 50 y 400 Hz.

Si bien son varios los criterios válidos para la clasificación de los diferentes tipos de unidades inerciales, la clasificación más común es la utilizada en el contexto militar. Los tipos de IMU identificados son las tácticas, las de navegación y las estratégicas



2.2. Navegación inercial

Dados dos marcos de referencia ortonormales i y b la transformación que permite el cálculo de las coordenadas en el marco i de un vector a partir de las coordenadas de éste en el marco b es:

$$x^i = x_0^i + R_b^i x^b \quad (1)$$

donde x_0^i es un vector de traslación fijo y R_b^i es la una matriz de rotación que define la orientación entre los dos marcos. Si i es el marco de referencia inercial y b el marco de referencia instrumental al que están referidos los

datos inerciales suministrados por la IMU, la determinación de la matriz R_b^i es posible mediante la integración de la ecuación diferencial siguiente:

$$\dot{R}_b^i = R_b^i \Omega_{ib}^b \quad (2)$$

donde Ω_{ib}^b es la matriz

$$\Omega_{ib}^b = \Omega(\omega_{ib}^b) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

siendo $\omega_{ib}^b = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ el vector medido por la IMU de velocidades de rotación del marco de referencia instrumental alrededor del marco de referencia inercial expresadas en el marco de referencia instrumental. Aquí el superíndice indica el marco de referencia en el cual están expresadas las velocidades angulares y los subíndices los marcos envueltos en el giro y la dirección de éste. Sirva esta notación para las posteriores ecuaciones expuestas.

Por otro lado, por la segunda ley de la física de Newton la ecuación que rige el movimiento de un cuerpo sometido al campo gravitacional de la tierra es:

$$\ddot{r}^i = g^i(r^i) + f^i \quad (4)$$

donde r^i es la posición del cuerpo, $g^i(r^i)$ es la aceleración debida al potencial gravitacional y f^i la fuerza específica medida por los acelerómetros de la IMU.

La combinación de las ecuaciones (2) y (4) da la ecuación fundamental de la navegación inercial o ecuación de mecanización del movimiento inercial:

$$\begin{aligned} \dot{r}^i &= v^i \\ \dot{v}^i &= R_b^i f^b + g^i(r^i) \\ \dot{R}_b^i &= R_b^i \Omega_{ib}^b \end{aligned} \quad (5)$$

donde ahora v^i es la velocidad en el marco de referencia inercial y f^b la fuerza específica medida por la IMU expresada en el marco de referencia instrumental.

Dadas una posición, una velocidad y una actitud inicial, la integración de la ecuación diferencial (5) permite el cálculo de la trayectoria efectuada por la IMU. Por cuestiones de comodidad se acostumbra a solucionar dicha ecuación expresada en otros marcos de referencia de manera que en la salida del cálculo se obtengan los valores deseados en marcos de referencia de más fácil interpretación. Una de las formas más usual de expresar la ecuación de mecanización del movimiento inercial aparece al utilizar un marco del tipo ECEF (Earth-Centered Earth-Frame). La ecuación (5) se convierte entonces en:

$$\begin{aligned}\dot{r}^e &= v^e \\ \dot{v}^e &= R_b^e f^b + 2\Omega_{ie}^e v^e + g^e(r^e) \\ \dot{R}_b^e &= R_b^e (\Omega_{ei}^b + \Omega_{ib}^b)\end{aligned}\quad (6)$$

donde r^e y v^e son la posición y la velocidad respectivamente en el marco de referencia geocéntrico, $g^e(r^e)$ es la aceleración debida al potencial gravitacional de la tierra en el marco geocéntrico, R_b^e es la matriz de rotación entre el marco de referencia instrumental y el marco de referencia geocéntrico, $\omega_{ie}^e = (0, 0, \omega_e)$ con ω_e la velocidad de rotación del marco de referencia geocéntrico respecto al marco inercial y $\omega_{ei}^b = -R_b^{eT} \omega_{ie}^e$.

Para una exposición completa de la extracción de estas formulas y otras expresiones de las mismas véase [3, 5, 11]

Debe observarse en este punto de la exposición que independientemente de la estrategia de cálculo utilizada para la extracción de la trayectoria a partir de los datos inerciales es ineludible la adopción de un modelo geopotencial de la tierra para el cálculo de la gravedad en cada punto donde tenga que ser solucionada la ecuación. Esta necesidad es el punto de partida de la gravimetría aerotransportada a partir de datos inerciales [4, 13]. Por simplicidad el modelo utilizado habitualmente es la gravedad normal asociada a un elipsoide de referencia geodésico [14].

El tratamiento de (5) o (6) como ecuaciones diferenciales ordinarias resulta insuficiente cuando no se dispone de IMU's muy precisas, situación habitual debido al alto coste de este tipo de instrumentos, dado que los errores sistemáticos, derivas y sesgos que presentan los sensores inerciales y los errores del modelo de gravedad invalidan el resultado de la integración. Este tipo de errores puede llegar a producir errores de kilómetros en cuestión de minutos. Solventar este problema pasa primeramente por interpretar dichas ecuaciones como un sistema dinámico estocástico [6, 10]. En este caso la solución obtenida de la integración será un proceso estocástico del que calcularemos la esperanza y la covarianza. Este tratamiento permite tener en cuenta las propiedades estadísticas de las observaciones inerciales para dar una descripción de las propiedades estocásticas de la solución. El siguiente paso para solventar los errores debidos a los sensores y a la inadecuación de los modelos de gravedad es el uso de observaciones adicionales que proporcionen información redundante para ser utilizada en un filtro de Kalman. Este procedimiento se describe en el apartado siguiente.

2.3. Filtro de Kalman. Corrección y calibración

Dado un sistema dinámico estocástico discreto lineal y un ecuación de observación también lineal

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \phi(t_k, t_{k+1})x_k + w_k \\ z_k &= H_k x_k + v_k\end{aligned}\tag{7}$$

donde x_k y x_{k+1} son los vectores de estado del sistema en los tiempos t_k y t_{k+1} respectivamente, $\phi(t_k, t_{k+1})$ es la matriz de transición del sistema entre los tiempo t_k y t_{k+1} , z_k es una observación adicional en el tiempo t_k , H_k es la matriz que relaciona z_k con x_k , y w_k y v_k son ruidos blancos no correlacionados cuyas respectivas covarianzas son Q_k y R_k .

Supongamos que hemos calculado x_k^- , nuestra estimación del estado del sistema en el tiempo t_k a partir de nuestro conocimiento del sistema hasta este mismo tiempo y las observaciones adicionales hasta el tiempo t_{k-1} . Notamos por

$$P_k^- = E((x_k - x_k^-)(x_k - x_k^-)^T)\tag{8}$$

la matriz de covarianza del error cometido en la estimación x_k^- .

Dada esta situación el filtro de Kalman permite calcular la mejor estimación del estado del sistema x_k a partir de x_k^- y z_k . Esta estimación que denotamos por x_k^+ se calcula a partir de las formulas:

$$\begin{aligned}x_k^+ &= x_k^- + K_k(z_k - H_k x_k^-) \\ P_k^+ &= (Id - K_k H_k)P_k^- \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}\end{aligned}\tag{9}$$

El estimador dado por el filtro de Kalman es óptimo en el sentido de mínima varianza o error cuadrático, es decir, minimiza los valores de la diagonal de la matriz P_k^+ . Para una exposición extensa del filtro de Kalman véase [2, 8]

Volviendo a la navegación inercial, el filtro de Kalman permite utilizar información redundante para estimar el estado del sistema dinámico descrito por las ecuaciones (5) y (6). Si bien esta información adicional puede obtenerse de diferentes fuentes, resulta de gran utilidad el uso de observaciones de sistemas GNSS, como por ejemplo el sistema GPS, ya que este tipo de observaciones tiene propiedades estocásticas complementarias a las inerciales. Lo que se consigue con el filtro es contrarrestar las malas cualidades estadísticas de los datos inerciales con las buenas características de error de los datos GNSS, a la vez que se consigue la estimación de la trayectoria a la alta frecuencia de los datos inerciales.

Debe observarse que en contra de los requisitos expuestos en (7) para la utilización del filtro de Kalman, la ecuación de mecanización del movimiento inercial no es lineal. Solventar este problema requiere el uso de técnicas de linealización y del llamado filtro extendido de Kalman [2, 8]

El uso en el filtro de Kalman de posiciones y/o velocidades extraídas de observaciones GNSS no tan solo permite corregir los errores cometidos en la estimación de estos parámetros sino que permite también corregir los errores en la estimación de la actitud. Puede observarse en las ecuaciones (5) y (6) que la determinación de la posición y la velocidad dependen de la actitud calculada, o equivalentemente, el error producido en la estimación de la posición y la velocidad es dependiente del error cometido en la determinación de la actitud. La cuantificación de esta dependencia en la matriz de covarianza del vector de estado del sistema permite al filtro de Kalman corregir errores en la orientación únicamente con información redundante de posición y/o velocidad.

Este mecanismo descrito es la idea fundamental para la calibración de los sensores inerciales, es decir, es posible la corrección de los errores cometidos por los sensores inerciales a partir de información redundante de posición y/o velocidad debido a que los errores en la estimación de la posición y velocidad dependen a su vez de los errores en los datos inerciales.

Para llevar a cabo la calibración de los sensores inerciales debe asignarse un modelo determinista y un modelo estocástico al error de los sensores para tener una descripción estadística de su comportamiento. Hecho esto, debe ampliarse la ecuación de mecanización del movimiento inercial con nuevos valores que estimen las derivas de los giróscopos y los sesgos de los acelerómetros en función del modelo estocástico escogido. Cuando es tomado un proceso de Gauss-Markov de primer orden para modelar los errores de la IMU la ecuación (6) se convierte en:

$$\begin{aligned}\dot{r}^e &= v^e \\ \dot{v}^e &= R_b^e (f^b + \delta f^b) + 2\Omega_{ie}^e v^e + g^e(r^e) \\ \dot{R}_b^e &= R_b^e (\Omega_{el}^b + \Omega_{ib}^b + \delta\Omega_{ib}^b) \\ \delta\dot{\omega}_{ib}^b &= -\alpha\delta\omega_{ib}^b \\ \delta\dot{f}^b &= -\beta\delta f^b\end{aligned}\tag{10}$$

donde $\delta\omega_{ib}^b$ son las derivas de los giróscopos δf^b las sesgos de los acelerómetros y α y β son matrices diagonales con valores positivos que dependen de las características específicas de cada sensor.

Este procedimiento permitirá que el filtro estime valores para las derivas y sesgos de los sensores. Estos valores serán utilizados como correcciones de los datos inerciales en la integración del sistema (10).

Otros modelos y variables pueden utilizarse para calibrar el sistema. Así por ejemplo, puede utilizarse un proceso de Gauss-Markov de orden superior para modelar el error de los sensores inerciales o añadir a (10) ecuaciones para estimar factores de escala, o la ortogonalidad de los ejes de la IMU.

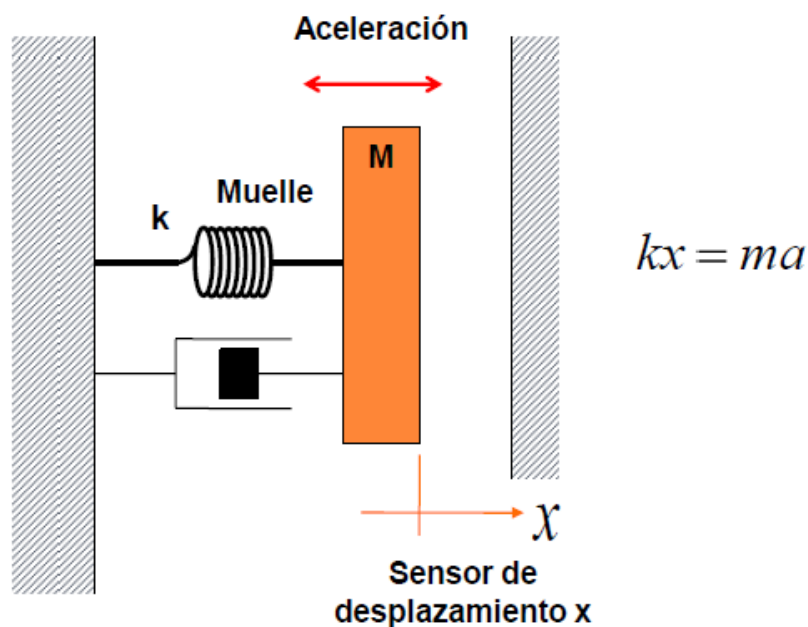
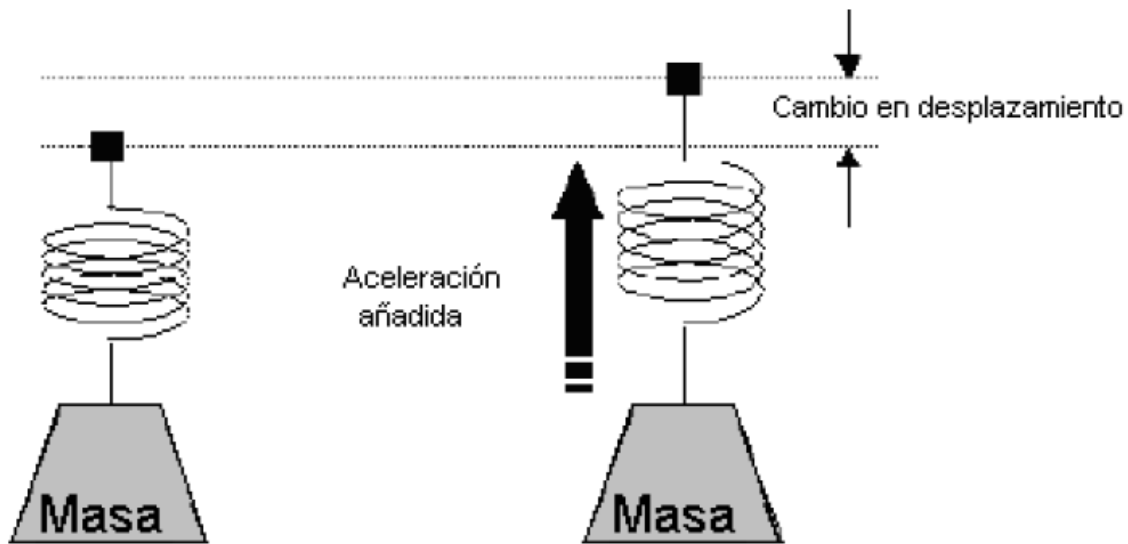
Finalmente debe observarse que el filtro también puede utilizarse para corregir otras variables que si bien, no entran propiamente dentro la integración del sistema dinámico estocástico, sí son utilizadas en el filtro. Por ejemplo el vector de excentricidad entre la IMU y la antena GPS cuando se está trabajando con este tipo de observaciones GNSS.

Acelerómetros. Medición de la aceleración.

Las técnicas convencionales para detectar y medir la aceleración se fundamenta en el primer principio descubierto por Newton y descritos en su Principio de Newton en 1687. La aceleración constante de una masa implica una fuerza $F = m \times a$, donde F es la fuerza, a es la aceleración y m es la masa.

Los sensores utilizados para medir la aceleración se denominan acelerómetros. Un acelerómetro como se intuye por su nombre es un instrumento para medir la aceleración de un objeto al que va unido, lo hace midiendo respecto de una masa inercial interna.

Los acelerómetros son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad.



Considerando un sistema mecánico simple, que consiste en una masa fija m , con un muelle con una rigidez k (constante). Si la masa se desplaza una distancia x , la aceleración debida a la fuerza restauradora del muelle es $F = k \cdot x$

Substituyendo en la ecuación de Newton, encontramos que $a = k \cdot x / m$ y podemos derivar la magnitud de la aceleración observando el desplazamiento x de la masa fija. Este principio fundamental se utiliza hasta en el más sofisticado y caro acelerómetro electromecánico; así también trabajan los modernos acelerómetros micro mecanizados. La Aceleración es el cambio de la velocidad. La unidad de medida es: m/s^2 , aunque podemos encontrarnos referencias de acelerómetros cuyo rango de actuación sea de varios g , donde g se define como $1g = 9.8m/s^2$.

Existen varios tipos de y diseños que aunque todos tienen el mismo fin pueden ser muy distintos unos de otros según la aplicación a la cual van destinados y las condiciones en las que han de trabajar. Al momento de seleccionar un acelerómetro hay que tener en cuenta varios factores: rango de aceleraciones a medir (no es lo mismo un acelerómetro para medir en el rango de los 0 a 100 g que uno para medir en el rango de 20 a 20000 g), el ancho de banda o rango de frecuencias en las que el sensor debe ser capaz de medir, la sensibilidad a los cambios de temperatura.

Hay dos parámetros principales a la hora de escoger el medidor adecuado, el rango de funcionamiento (acel. Máxima) y frecuencia. Otros parámetros importantes pueden ser el tamaño, si tienen más funciones, la resistencia a golpes y por supuesto el precio.



Los acelerómetros piezoeléctricos de METRA o acelerómetros IEPE, también conocidos como acelerómetros ICP comercialmente, son acelerómetros pensados para la medida de medias y altas frecuencias. Por su característica física, constan de un material piezoeléctrico que al ser manipulado mecánicamente proporciona una tensión muy pequeña, proporcional a ese movimiento.

Acelerómetros piezoeléctricos

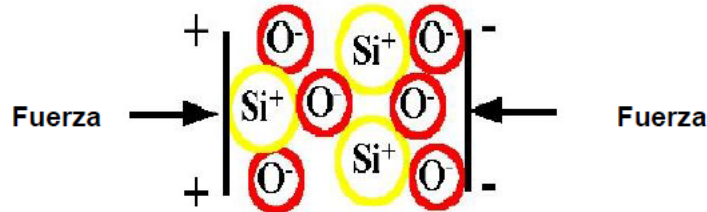
Existen diferentes formatos de acelerómetro piezoeléctrico, sellados en acero inoxidable, con agujero pasante, triaxiales, etc., lo que prácticamente todos comparten es su amplio ancho de banda, que parte desde unos pocos Hz hasta los miles de Hz. Aplicaciones típicas son la medida de vibraciones en máquinas.

Características:

- Sólo son posibles medidas dinámicas
- La carga generada es del orden de pC
- Tiempos de subida muy reducidos (del orden de microsegundos)
- Se pueden llegar a medir frecuencias de decenas kHz
- Coeficientes de temperatura 0,01 a 0,05%/°C (típ.)
- Suelen presentar derivas del cero
- Sensibilidad elevada
- Robustez

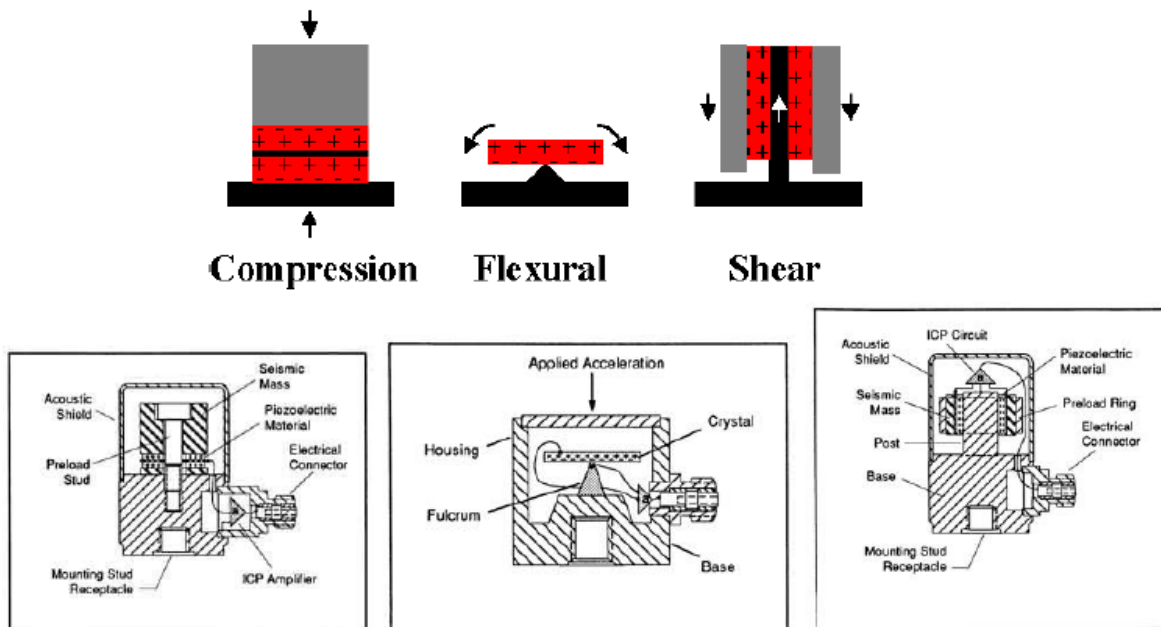
Funcionamiento:

El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales piezoeléctricos. Estos cristales cuando son sometidos a alguna fuerza producen una corriente eléctrica, a causa de la variación de su estructura cristalina. Así que poniendo un cristal de este tipo entre la carcasa (unida al objeto cuya aceleración se quiere medir) y una masa inercial se producirá una corriente cuando ocurra una aceleración ya que la masa ejercerá una fuerza sobre el cristal. Midiendo esta corriente podremos calcular la aceleración, bien directamente si se trata de un acelerómetro de salida de corriente (culombios/g) o bien convirtiéndola a un voltaje de baja impedancia si se trata de un acelerómetro de salida de voltaje (ejemplo IEPE).

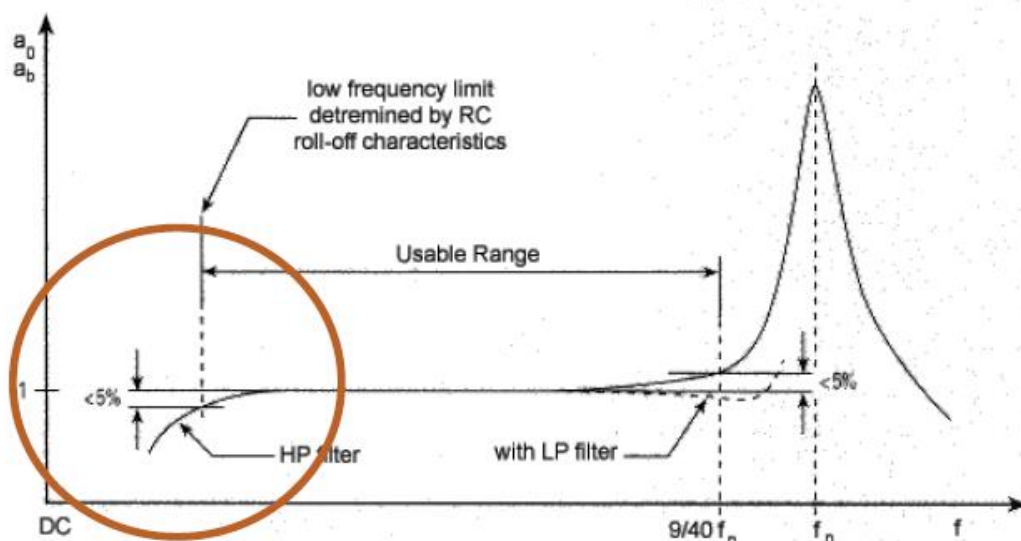


Cuarzo	Cerámicos
<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elevada sensibilidad en tensión ♦ Muy buena estabilización a largo plazo ♦ No es piroeléctrico ♦ Coeficiente de temperatura bajo 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Elevada sensibilidad en carga ♦ Gran variedad de formas y tamaños ♦ Pueden llegar a temperaturas de hasta 540°C ♦ Son piroeléctricos ♦ Variaciones acusadas con la temperatura

Tipos de acelerómetros piezoeléctricos:



Respuesta en frecuencia de un acelerómetro piezoeléctrico:



A la hora de utilizar este tipo de sensores para medir la aceleración podemos encontrar diversos tipos en el mercado con distintos valores de sensibilidad, alcance de la medida, banda de frecuencia de uso, etc., aunque la mayoría suelen ser de dos tipos, los sensores propiamente dichos y los que incorporan un amplificador. Los sensores piezoeléctricos pre-amplificados van

siendo cada vez más habituales por la comodidad de su uso, ya que producen un valor de tensión proporcional a la excitación aplicada en la salida del amplificador y su comportamiento resulta independiente del conexionado exterior puesto que carga y resistencia de entrada del amplificador se mantienen constante siempre. Este tipo de sensores precisa alimentación. Los sensores piezoeléctricos propiamente dichos no incorporan más que el dispositivo sensor, careciendo de una salida tan cómoda como los anteriores. Para medidas a bajas frecuencias los acelerómetros MEMS son la elección correcta, por no introducir atenuación ni desfase en la señal.

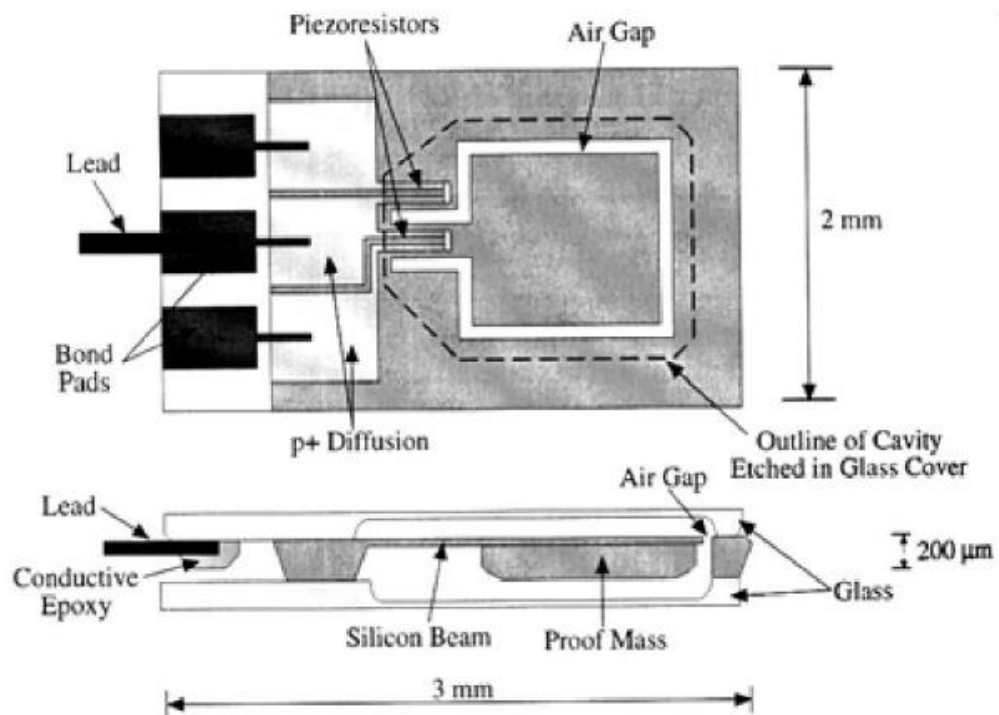
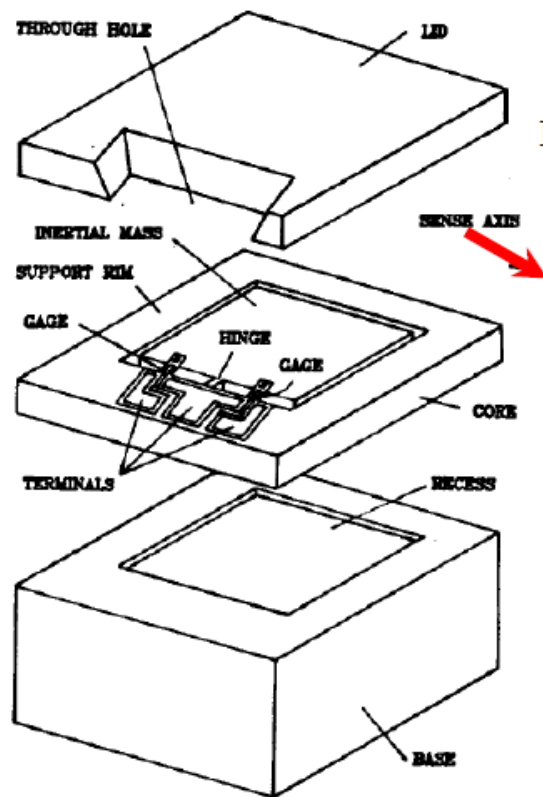
Acelerómetros Piezorresistivos

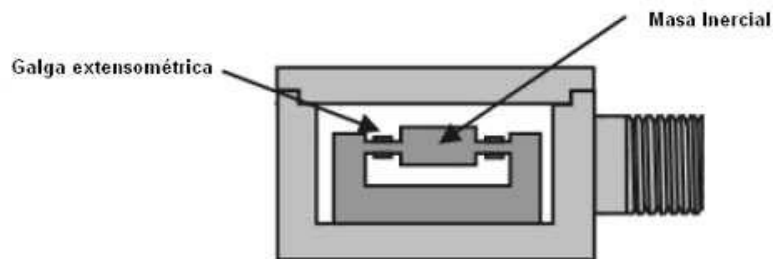
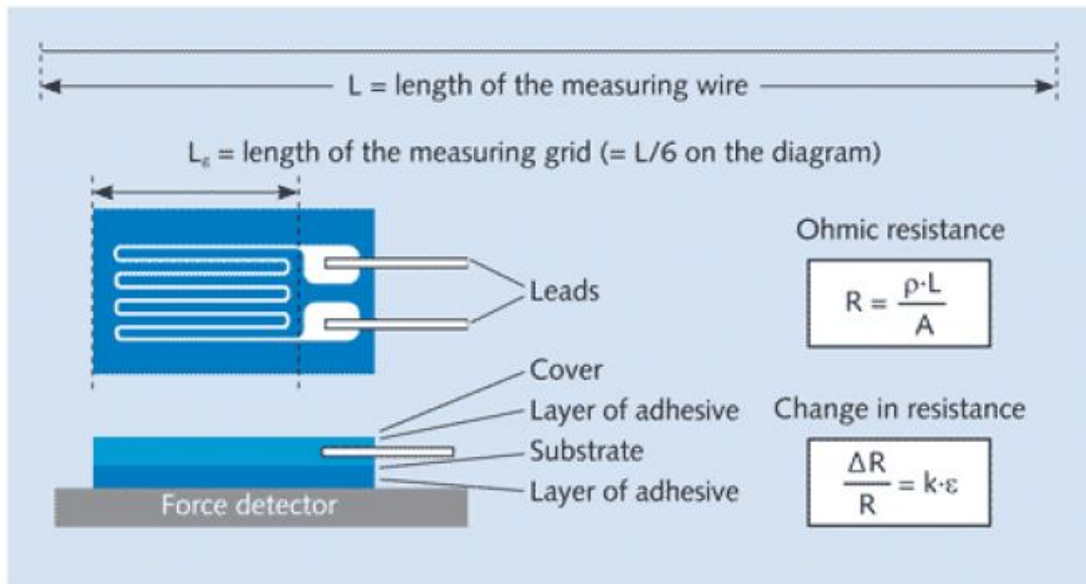
Los acelerómetros piezorresistivos son un tipo de acelerómetros pensados para la medida de aceleraciones o vibraciones en baja o media frecuencia.

Emplean una masa inercial unida a una base mediante soportes elásticos en los cuales se instalan galgas extensométricas. Cuando el dispositivo es sometido a una aceleración la inercia de la masa hace que los soportes se deformen modificando así la resistencia de la galga extensométrica; el dispositivo va conectado a un puente de Wheatstone que detecta esta variación.

Su principal característica es que pueden medir desde 0Hz hasta varios cientos de Hz, con rangos que parten de los 2g y pueden llegar a los 6000g.

Algunas aplicaciones típicas de los acelerómetros piezorresistivos son los ensayos para la seguridad en el automóvil, análisis de confort en vehículos o trenes, monitorización de estructuras en obra civil, etc.

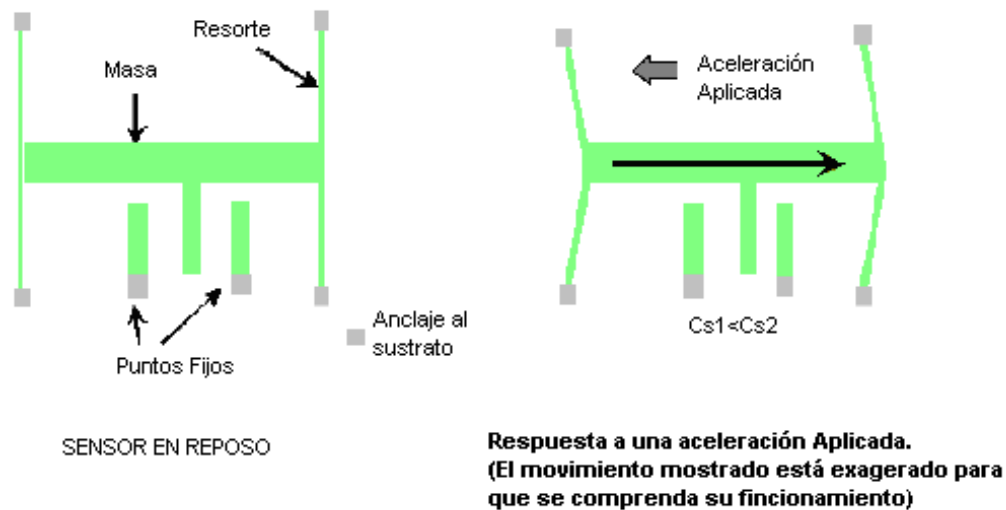




Acelerómetros capacitivos

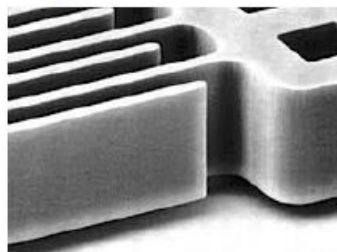
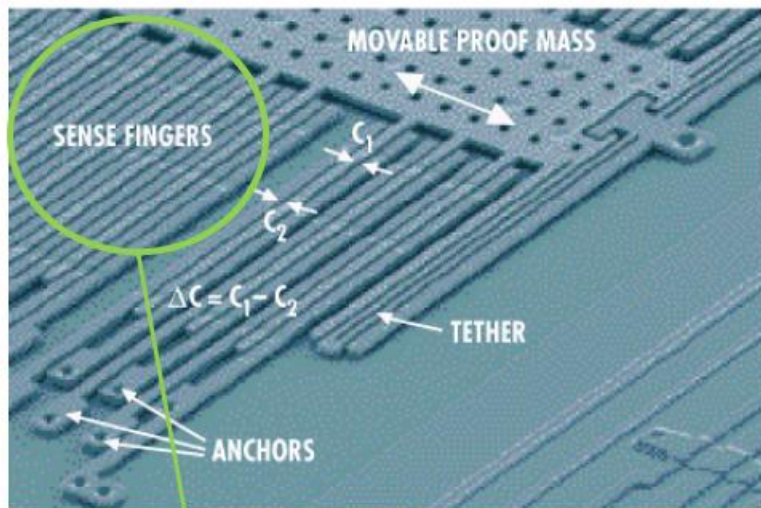
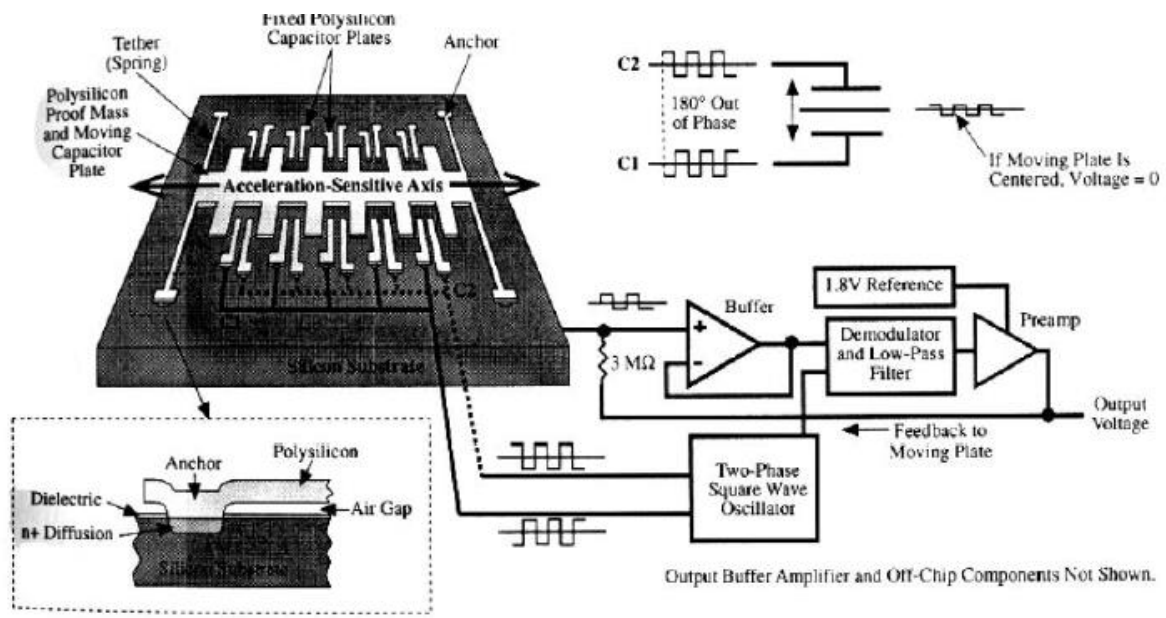
Modifican la posición relativa de las placas de un microcondensador cuando está sometido a aceleración. El movimiento paralelo de una de las placas del condensador hace variar su capacidad. Los acelerómetros capacitivos basan su funcionamiento en la variación de la capacidad entre dos ó más conductores entre los que se encuentra un dieléctrico, en respuesta a la variación de la aceleración. Los sensores capacitivos en forma de circuito integrado en un chip de silicio se emplean para la medida de la aceleración. Su integración en silicio permite reducir los problemas derivados de la temperatura, humedad, capacidades parásitas, terminales, alta impedancia de entrada, etc. Cuando se observa el sensor micromecanizado parece una "H". Los delgados y largos brazos de la "H" están fijos al sustrato. Los otros elementos están libres para moverse, lo forman una serie de filamentos finos, con una masa central, cada uno actúa como una placa de un condensador variable, de placas paralelo.

La aceleración o desaceleración en el eje "SENSOR", ejerce una fuerza a la masa central. Al moverse libremente, la masa desplaza las minúsculas placas del condensador, provocando un cambio de capacidad. Este cambio de capacidad es detectado y procesado para obtener un voltaje de salida.



El dispositivo realmente trabaja en un lazo de control electrónico de fuerza/balanceo. Este lazo de control evita el movimiento de la masa en aceleración, por la aplicación de una fuerza igual pero opuesta creada por la aplicación de un voltaje en las placas del condensador. Este voltaje aplicado es directamente proporcional a la aceleración.

Los acelerómetros capacitivos tienen la característica de poder medir aceleración desde 0Hz hasta varios cientos de Hz, por lo que se suelen emplear para aplicaciones de baja o muy baja frecuencia, aunque cuentan con muy buena resistencia a posibles picos de aceleración. Algunos diseños pueden soportar aceleraciones de 30000g lo cual permite usarlo en mediciones de aceleración de proyectiles de cañón.



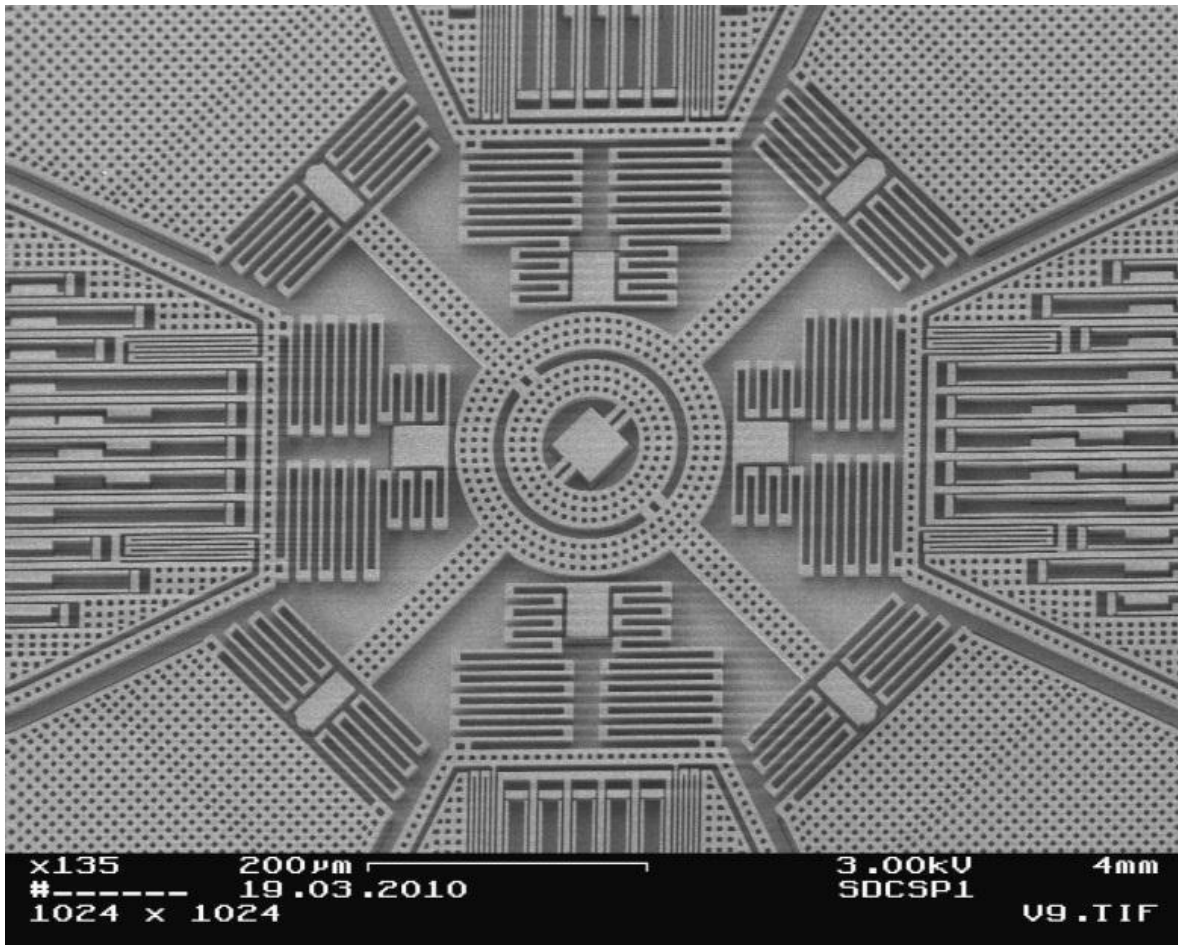
Giróscopos. Medición de la velocidad de giro

Giróscopos MEMs

Los giróscopos MEMs (por Micro Electronic Machine) son un tipo de giróscopo desarrollados en la década de los 90 y se basan en la tecnología de las máquinas microelectromecánicas. Su costo es inferior al de los demás tipos de giróscopos y se utilizan en una gran variedad de dispositivos (celulares, controles remotos, automóviles, vehículos no tripulados, etc.). Su estructura tiene una apariencia muy similar a la de los acelerómetros capacitivos descritos en la sección anterior, con la diferencia que una parte de la estructura se hace vibrar de forma constante.

Su funcionamiento se basa en el efecto de la fuerza de coriolis que hace que un cuerpo que oscila en un plano se oponga a cambiar de plano. Si se tiene una masa suspendida por unos soportes elásticos vinculados a una base, y esa masa se encuentra oscilando en un plano y se aplica una velocidad angular a la base de forma tal que se altere el plano de oscilación, la masa tratará de oponerse a ese cambio de plano o rotación, y este efecto durará el tiempo de dure el movimiento de rotación; una vez detenida la rotación, la masa se acomoda al nuevo plano de oscilación. La oposición al cambio de plano se manifiesta mediante la deformación de la estructura del acelerómetro, y midiendo esa deformación se obtiene una medida de la velocidad de rotación del dispositivo.

Existen varios modelos de osciloscopio los cuales varían según el tipo de estructura oscilante, que puede tener forma de disco, de placa, de tenedor, etc. El método para medir la deformación es el mismo que en los acelerómetros capacitivos. A continuación se muestra una foto de un giróscopo mems



Para mas detalles sobre el funcionamiento seguir el siguiente link:

<https://www.youtube.com/watch?v=5BWerr7rJmU>

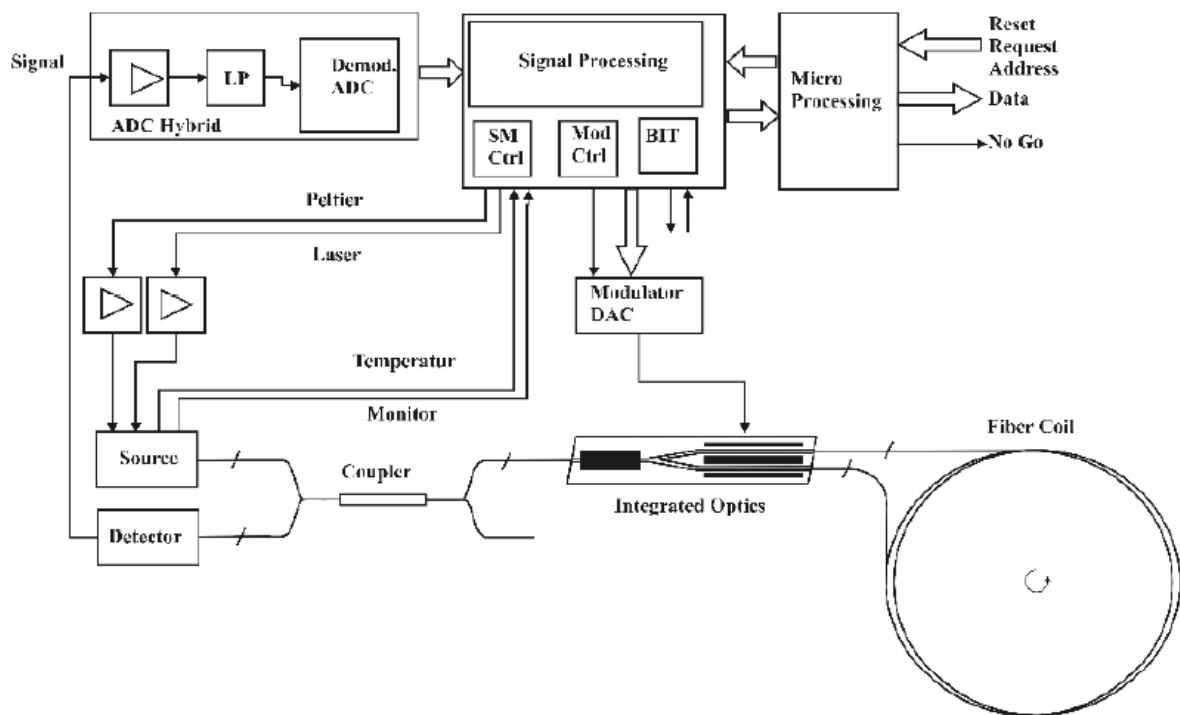
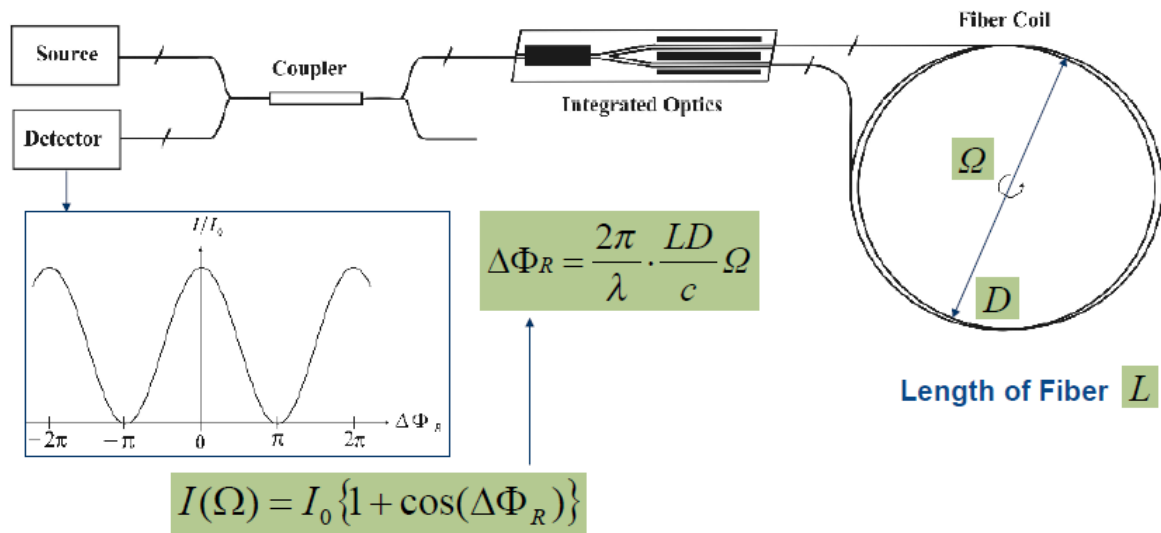
Giróscopos Láser

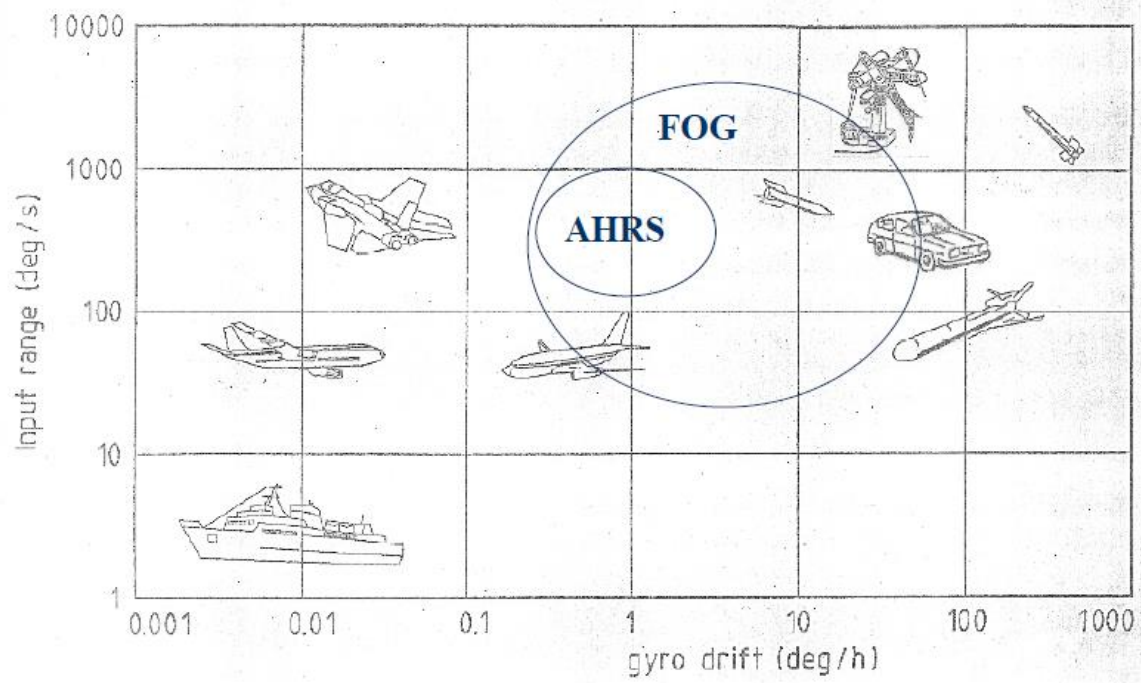
Éste tipo de giróscopo opera basado en el efecto de Sagnac, el cual es un fenómeno interferométrico asociado al movimiento de rotación. El mismo se manifiesta en una configuración denominada interferometría de anillo, donde un haz de luz se divide en dos rayos que siguen trayectorias en direcciones opuestas dentro de un anillo, la trayectoria de la luz debe rodear un área y volver al punto de entrada, si se compara el patrón de interferencia de los dos rayos salir del aparato, se puede observar que el mismo es afectado por la velocidad de rotación del anillo en cuestión. En otras palabras, el movimiento de rotación afecta la frecuencia de los haces haciendo que uno aumente su frecuencia y el otro la disminuya.

En el caso del giróscopo de fibra óptica, un láser externo inyecta los dos rayos a un anillo de fibra óptica, y la rotación del sistema entonces causa un cambio de fase relativo entre los dos rayos (cuando se interfieren después de su paso a través del anillo de fibra) proporcional al índice de

rotación. El anillo por el cual viajan los haces de luz está formado por una bobina de fibra óptica que en algunos casos puede alcanzar una longitud de 5000 m (a mayor longitud, mayor sensibilidad, el efecto Sagnac se multiplica en función del número de vueltas).

El rango de operación es de 0,0001°/s a 800°/s, con una resolución angular de 0,1urad.

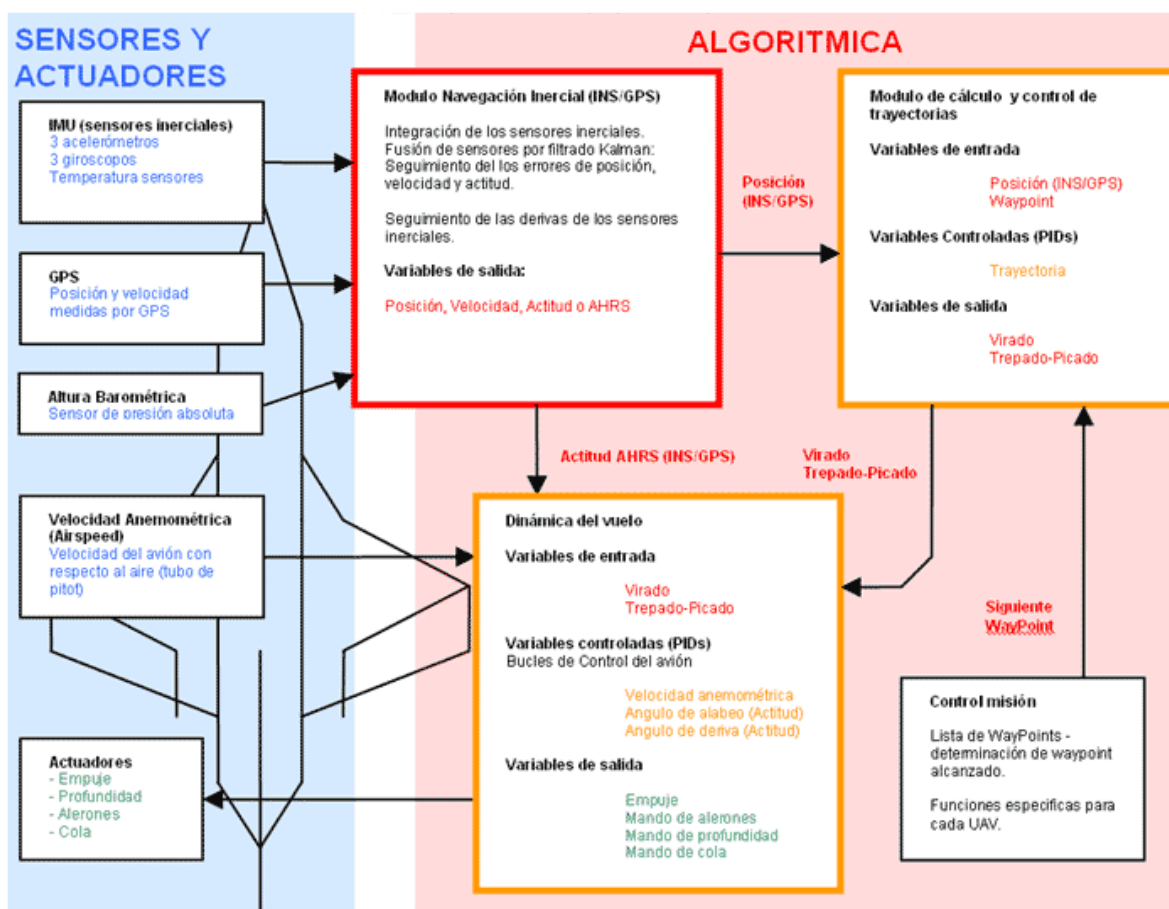




► **FMU-3N:**
Inertial
Measurement Unit



Integración INS/GPS



El GPS se usa para hacer un cálculo de la desviación de las medidas y por tanto sirve para corregir estas medidas. Este algoritmo inercial asistido por GPS se llama INS/GPS.

¿Porque no se usa directamente la señal del GPS?, la señal de GPS que vemos ya está muy procesada por un algoritmo basado en Kalman (la señal original es muy ruidosa), este algoritmo nos da una señal normalmente a 1Hz (hasta 10Hz para GPS militares pero no por ello más precisa que la de 1Hz), lo cual no es suficiente para establecer ningún bucle de control. Sin embargo la señal del GPS (1hz y 5m de error) es increíblemente buena para hacer un seguimiento del error de las medidas inerciales, de esta combinación sacamos una señal a 500Hz (si la velocidad de proceso nos diese) de aceleración lineal, velocidad lineal, posición global, aceleración angular, velocidad angular y posición angular del avión, que nos permiten hacer cualquier estrategia de control.

En cualquier caso tiene que quedar claro que los datos de GPS **SOLO** se usan para calcular los errores del modulo de navegación inercial. A la posición calculada por este algoritmo se le llama posición (INS/GPS), a las velocidades, Velocidad (INS/GPS) y a todos lo referente ángulos y velocidades angulares se le llama ACTITUD o AHRS (AHRS Attitude and Heading Reference Systems, la traducción al español podría ser horizonte artificial).

Todos estos datos se envían a los módulos que establecen los bucles de control para pilotar el avión, por una parte el AHRS se envía al modulo de dinámica del vuelo que se encarga de mantener el avión nivelado, mantener las velocidades, etc. este modulo esta a los mandos del avión. Mientras que la posición (INS/GPS) se envía al modulo de trayectorias, rumbos; que mira donde está el avión, a donde tiene que llegar y decide si tiene que virar y posteriormente le dice al modulo de dinámica del vuelo cuanto tiene que virar, subir, bajar...