TEMA 7. Sistemas de navegación.

CUD de Zaragoza.

En este tema las referencias fundamentales se toman del manual de la Academia de Artillería ACART-VA-011 (2009): capítulos 5, 6 y 7.

De todos modos, para los propósitos de este curso, basta con el resumen contenido en estos apuntes y consultar las figuras de dicho manual que se irán indicando.

En este tema, se trabajará con mayor detalle que en el tema 2 sobre los "sensores internos de estabilización" empleados por un misil, al menos en su sistema de control. En algunos casos, autoguiado indirecto por navegación inercial, los mismos tipos de dispositivos físicos se emplean también como "sensores de trayectoria".

Su finalidad última es medir los movimientos del misil alrededor de su centro de masas, los movimientos del eje del sensor que mide la LOS con respecto al eje del misil en los sistemas con detectores a bordo y los desplazamientos del centro de masas del misil. Para las dos primeras misiones se emplean giróscopos, ya bien sean de posición o de velocidad (girómetros); mientras que para la tercera se emplean acelerómetros.

Cuando un giróscopo se emplea para medir ángulos, hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

3) Los giróscopos más usuales son mecánicos u ópticos. Los giróscopos ópticos aprovechan el efecto Sagnac. Los giróscopos mecánicos son, esencialmente, piezas mecánicas con simetría de revolución (de tal forma que el eje de revolución y dos ejes cualesquiera perpendiculares al mismo sirvan como sus ejes principales de inercia), rotando a una gran velocidad angular en torno a su eje de simetría (rotación propia) de tal forma que su momento angular sea grande, esté alineado con la velocidad angular (productos de inercia nulos respecto a los ejes principales de inercia) y los cambios relativos que experimente bajo la acción de un impulso angular externo sean pequeños (rigidez giroscópica).

2) Se puede medir el ángulo de actitud, el ángulo que haya girado el eje de simetría del misil con respecto a un referencia fija, y el ángulo que forma la LOS (indicada por el eje de un sensor apuntando hacia el blanco) con respecto al eje de simetría del misil. Un mismo giróscopo no puede realizar ambas medidas: habría uno asociado a la carcasa del misil para medir su rotación con respecto a una referencia fija y otro asociado al sensor para medir su rotación o bien con respecto a la carcasa, o bien con respecto a la referencia fija si el sensor se encuentra sobre una plataforma giroestabilizada.

3) Con un giróscopo no se puede medir ni el ángulo de ataque, ni el ángulo de pendiente. No suministra información sobre la velocidad lineal del misil.

4) Los giróscopos pueden emplearse para crear plataformas giroestabilizadas. Aunque el misil rote con respecto a una referencia fija, una plataforma giroestabilizada conserva esa referencia

fija aun estando dentro del misil; con respecto al misil, está rotando con la misma velocidad y sentido contrario que el misil con respecto a la referencia fija.

1. Giróscopo de posición.

Como ejemplo se tomará el giróscopo libre descrito en la sección 5.3 del manual ACART-VA-011 (2009). En concreto, se aconseja tener presente en todo momento las figuras 2, 10 y 11 que aparecen en dicha sección.

El giróscopo libre es un dispositivo con un elevado momento angular que está unido al resto del misil mediante una doble unión Cardan. Va montado sobre un anillo interior, si la unión es ideal no hay resistencia y el giróscopo no se frena, que se une mediante una unión Cardan a un anillo exterior, unido a su vez mediante otra unión Cardan a la carcasa del misil, véase la figura 2 del capítulo 5 de ACART-VA-011 (2009).

Las uniones Cardan ideales, sin resistencia de ningún tipo, son incapaces de transmitir momentos. En consecuencia mientras la carcasa del misil arrastra consigo a los anillos en su rotación, éstos son incapaces de ejercer torques sobre el giróscopo que se encuentra en el centro y su momento angular se conserva. Puesto que la dirección del momento angular coincide con la de su eje de rotación (dispositivo simétrico), la conservación del momento angular implica la conservación del eje de rotación que mantiene una orientación constante con respecto a una referencia fija.

Un mismo giróscopo libre permite medir dos rotaciones: la del giróscopo junto con el anillo interior con respecto al anillo exterior y la de todo el dispositivo, anillo exterior incluido, con respecto a la carcasa, véase la figura 10 del capítulo 5 de ACART-VA-011 (2009). Sin embargo, no presenta ningún tipo de resistencia frente a rotaciones de la carcasa en torno a su eje de simetría: si la carcasa como un todo rota en torno al eje de simetría del giróscopo, el dispositivo no sufre ninguna alteración relativa a la propia carcasa que sea medible. En consecuencia, si se necesitan controlar tres ejes de rotación, se necesitarán al menos dos giróscopos de posición con sus respectivos ejes de simetría alineados en perpendicular; cada uno sería capaz de medir las rotaciones en torno a los respectivos ejes perpendiculares a su eje de simetría por lo que habría una media duplicada.

Las rotaciones entre la estructura y el anillo exterior por un lado y entre los dos anillos por el otro se pueden convertir en señales eléctricas aprovechables por la electrónica de control del sistema mediante transductores: generadores de corriente como los estudiados en las asignaturas “Física II” y “Electrotecnia” que aprovechan la rotación para que el flujo de un campo magnético, creado por un imán permanente en una pieza, varíe a través de un conductor eléctrico con forma de espira en la otra pieza y surja una fuerza electromotriz inducida sobre el circuito al que pertenece el conductor.

Puesto que un giróscopo de posición mantiene fijo su eje de rotación propia, un gran bloque giroscópico puede funcionar como plataforma giroestabilizada con respecto al resto del misil para los componentes que vayan montados sobre ella. A lo sumo, en caso necesario, habría que restar los efectos debidos a la rotación propia de velocidad angular conocida para que dicha plataforma fuese completamente equivalente a una referencia fija. Si el misil tiene un sensor, es frecuente que todo el bloque sensor esté giroestabilizado de tal forma que su eje de rotación propia apunte hacia el blanco (dirección de la LOS); esto implica la necesidad de transmitir torques al giróscopo interior giroestabilizado para que la orientación del eje de rotación propia pueda ir cambiando. Normalmente, esto se consigue mediante electroimanes que actúan directamente sobre el giróscopo interior.

1.1. Limitaciones de los giróscopos de posición.

Si el anillo interior y el exterior se alinean entre sí, véase la figura 13 del capítulo 5 de ACART-VA-011 (2009), las uniones Cardan B y B' de esa figura responden ejerciendo un torque frente a rotaciones en torno al eje AA'. Cuando el anillo interior está inclinado con respecto a la posición de la figura, ese torque se puede descomponer en una componente alineada con la rotación propia (y que no se transmite al giróscopo si las uniones son ideales sino que provoca la rotación de todo el sistema según el eje de rotación propia) más una componente alineada con el eje CC' que produce una rotación del anillo exterior con respecto a la carcasa. Cuando la alineación es perfecta (en la práctica, menos de 3^o de desalineación), esa posibilidad de descomponer el torque externo desaparece (los dos ejes de la descomposición se vuelven perpendiculares al torque) y pasa a transmitirse al giróscopo interno cuyo eje de rotación propia modifica su dirección. Este fenómeno se conoce como **enganche del Cardan** y limita el valor máximo de los ángulos de rotación que se pueden medir; a efectos prácticos menos de 87^o.

El hecho de que las uniones no sean ideales (tienen rozamiento) y de que el dispositivo rotatorio no tenga una simetría de revolución perfecta en su distribución de masas (desequilibrios) dan lugar al fenómeno de la **deriva (drift)** por el que la dirección del eje de rotación propia va cambiando lentamente. Esto limita la precisión para tiempos de vuelo largos.

1.2. Medidas para incrementar la precisión de un giróscopo de precisión.

Puesto que, en condiciones reales, la velocidad angular de rotación propia se frena por rozamiento. Es frecuente añadir tanto mecanismos reductores de dicho rozamiento (cojines de aire, suspensión electrostática o magnética, uso de líquidos lubricantes y juegos dobles de cojinetes, ...), como dispositivos motrices que incrementen el valor de la velocidad angular de rotación propia. Si resulta crítico fijarla a un valor lo más exacto posible hay que emplear un motor eléctrico de señal alimentada por un transductor que convierta la rotación propia en una corriente eléctrica que haya que mantener constante mediante la acción del motor. Normalmente, no es necesaria una gran precisión sino el limitarse a mantener un valor elevado del momento angular del giróscopo y esto se puede lograr mediante álabes rotatorios que aprovechen una pequeña parte de la energía de los gases de escape para forzar los giróscopos de modo mecánico.

2. Giróscopo de velocidad. Girómetro.

En lugar de producir una señal interpretable como la cuantía del giro experimentado por el misil en torno a una referencia fija indicada, se limitan a medir la velocidad angular de rotación. De todos modos, un dispositivo electrónico integrador es capaz de deducir la magnitud del giro a partir de la señal de velocidad angular. Modernamente, casi todos los giróscopos empleados son de este tipo por su mayor robustez, pequeño tamaño y versatilidad[1] y por estar exento de los problemas debidos al **enganche Cardan** y a la **deriva**. Sin embargo, presenta limitaciones en cuanto a su respuesta transitoria ya que no miden las velocidades angulares de forma inmediata sino que su salida es la de una oscilación amortiguada superpuesta al valor correspondiente a la velocidad angular real.

[1] Capacidad de adaptarse a distintas funciones

2.1. Girómetro mecánico.

Es similar al giróscopo de posición, véanse las figuras 1 y 2 del capítulo 6 de ACART-VA-011 (2009); sin embargo, el giróscopo en lugar de ir montado sobre un doble anillo, lo va sobre un único anillo. Con respecto al giróscopo libre es como si se hubiese suprimido el anillo exterior y el interior fuese unido directamente a la carcasa. Además, aparece una segunda unión del tipo muelle-amortiguador en perpendicular al eje de giro del anillo de la montura y capaz de ejercer torques sobre el mismo.

Frente a rotaciones en torno al eje perpendicular al de rotación propia y el de rotación del anillo, surgen torques en la unión Cardan que se transmiten al giróscopo a través del sistema muelle-amortiguador.

Frente a rotaciones en torno al "Input Axis" de la figura 4 del capítulo 6 de ACART-VA-011 (2009), el eje de rotación propia acompaña al resto del misil en esa rotación. Si la velocidad angular de rotación propia del giróscopo es mucho mayor que la de maniobra del misil, ésta última se puede considerar como una velocidad angular de precesión ($\vec{\Omega}$ en la asignatura de "Mecánica") del giróscopo tomado como un todo. Es decir, el momento angular rota en el plano perpendicular al "Input Axis"; para ello, debe recibir un momento alineado con el eje "Output Axis" que pertenece a ese plano perpendicular y es, a su vez, perpendicular al vector momento angular que ha de precesionar [2]. Repasando la figura 4 del capítulo 6 de ACART-VA-011 (2009), se puede ver que el sistema muelle-amortiguador está aplicado sobre el anillo de modo que genere torques alineados con el "Output Axis" de la figura.

En resumen, la velocidad angular de precesión del giróscopo, que es la velocidad angular de giro del misil considerado como un todo, depende de la deformación experimentada por el muelle. Esa deformación se puede medir como un pequeño ángulo ϕ de inclinación del giróscopo y su anillo con respecto al plano perpendicular al "Input Axis". Esa deformación se traduce sobre el anillo del girómetro en un torque de valor $K\phi$ donde la constante K dependería de la constante del muelle, del punto de aplicación de la fuerza ejercida por el mismo y de la correspondencia entre desplazamientos lineales del muelle y el ángulo ϕ. Ese torque será el responsable de que el momento angular del giróscopo precesione con la misma velocidad angular que la rotación del misil como un todo en torno al "Input Axis".

Suponiendo que $\vec{\Omega}$ (rotación del misil y precesión del giróscopo) es mucho menor que $om\vec{e}ga_p$ (rotación propia del giróscopo) y llamando ejes X, Y y Z al "Input Axis", "Output Axis" y "Eje perpendicular a ambos" según la figura 4 del capítulo 6 de ACART-VA-011 (2009), se tiene que

$$\vec{J_0} = I_{\parallel}\omega_r\hat{k}$$

es el momento angular inicial del giróscopo. Su variación bajo precesión vendrá dada por

$$\Omega \times \vec{J_0} = -\Omega I_{\parallel}\omega_r\hat{\jmath}$$

que habrá de ser igual al torque suministrado por el muelle $-K\phi\hat{\jmath}$.

De ese modo se puede despejar la velocidad de giro del misil mediante

$$\Omega = \frac{K\phi}{I_{\parallel}\omega_r} \tag{1}$$

[2] Recuérdese de las asignaturas de "Física I" y "Mecánica" que una rotación de un vector se manifiesta en la aparición de una componente normal al mismo, sobre el plano de giro.

donde la lectura de ϕ se realiza a través de un transductor que convierta esa rotación en una corriente eléctrica.

El dispositivo amortiguador es necesario ya que la respuesta natural de un muelle sin amortiguación es la de un movimiento armónico simple en torno a la posición de equilibrio, asignaturas de "Física I" y "Física II". Para que la solución acabe igualándose con el valor de equilibrio se necesita un amortiguamiento. Lógicamente, la respuesta transitoria en forma de oscilación amortiguada se traduce en un retraso entre el fenómeno medido, la velocidad angular del misil, y la consecución de una medida fiable del mismo.

Puesto que un girómetro sólo puede medir velocidades angulares según una dirección. Si se necesitan controlar todas las rotaciones, se necesitan tres giróscopos de velocidad.

2.2. Girómetros ópticos.

Carecen de componentes móviles lo que incrementa su fiabilidad. Basan su funcionamiento en el efecto Sagnac.

Un rayo de luz de alta coherencia (láser) viaja por dos sentidos distintos a lo largo de un camino cerrado. La coherencia significa que ambos haces tienen, en principio, la misma fase y, por lo tanto, la interferencia estudiada en "Física II" se manifiesta como un patrón de ondas estacionarias en posición estática.

Cuando el sistema rota en torno a un eje perpendicular al del camino óptico, el efecto Sagnac implica que uno de los rayos de luz recorre un camino más corto que el otro antes que de ambos experimenten interferencia sobre la posición en la que se encuentra el sensor. El efecto es que, en la posición del sensor, el desfase al que tiene lugar la interferencia va cambiando y, por lo tanto, la intensidad de la señal luminosa. La velocidad con la que los máximos y mínimos del patrón de interferencia se van desplazando por la posición del sensor depende de los detalles de la forma exacta del camino recorrido y de la velocidad angular de rotación.

Tiene como problemas la **deriva** que se manifiesta como rotación del patrón de interferencia en ausencia de rotación del misil cuando el gas presente en la zona atravesada por el láser se ioniza bajo la acción del propio láser y el **anclaje en frecuencia** que se manifiesta como una incapacidad de medir velocidades angulares muy bajas causada por imperfecciones del sistema óptico empleado. Para contrarrestar el primer problema se emplean ánodos en lugares opuestos que redireccionen el gas ionizado según flujos en sentido opuesto que se anulan. Para contrarrestar el segundo problema se somete el instrumento a una pequeña vibración que destruya las posibles interferencias que surjan entre el haz láser incidente en un espejo y la componente del reflejo dispersivo (causado porque los espejos no son perfectos) que va hacia atrás e interfiere con el haz incidente modificando, con ello, el patrón final de interferencias que debe ser medido.

3. Acelerómetro.

Se encarga de medir la aceleración que experimenta el centro de masas del misil con respecto a un sistema de referencia inercial. Únicamente mide la componente de la aceleración según su eje de referencia. En tres dimensiones, harían falta tres acelerómetros en perpendicular entre sí para medir el vector aceleración completo.

Cuando el misil está rotando o bien los acelerómetros van montados sobre una plataforma giroestabilizada, o bien se resta la componente centrípeta de la aceleración (deducible a partir de la lectura de los girómetros) y se proyecta la lectura sobre los ejes de referencia iniciales (por integración de la lectura girómetrica se puede saber la rotación total que hay que restar a la orientación actual de los acelerómetros para recuperar los ejes originales).

Los acelerómetros en reposo miden la aceleración de la gravedad; se trata de un valor constante que hay que restar a su lectura.

3.1. Acelerómetro lineal.

Como dispositivo mecánico constan de una masa que se puede deslizar, idealmente sin rozamiento, sobre unos raíles que marcan la dirección sensible del aparato. Si el misil experimenta una aceleración según esa dirección, la ausencia de rozamiento hará que la masa siga en reposo y que empiece a haber un deslizamiento relativo entre ambos cuerpos. Para evitar que la masa acabe chocando contra la carcasa del misil, ambos cuerpos se unen mediante un muelle. En equilibrio, el estiramiento o compresión del muelle es responsable de producir la fuerza necesaria para acelerar o frenar la masa del acelerómetro; conocida ésta, se divide la fuerza por la masa y se obtiene la aceleración.

Pero, recuérdese que la respuesta natural de todo muelle perfecto es la de un oscilador armónico; superpuesta a la solución de equilibrio a una señal oscilatoria. Se añade un amortiguador al sistema para reducir las oscilaciones en torno a la posición de equilibrio. Lógicamente, esto significa que se produce un retraso entre el efecto físico a medir (la aceleración del misil) y el instante en el que la lectura del sensor es fiable.

Un potenciómetro [3] se encarga de transformar el deslizamiento de la masa con respecto a los raíles en una señal eléctrica (hace el papel de un transductor).

3.2. Acelerómetro de péndulo.

Consta de una masa oscilante unida a una barra de torsión cuyo giro es convertido en una señal eléctrica por un transductor.

Ante una fuerza externa, gravedad incluida, actuando sobre el misil, la masa del péndulo tendrá una posición de equilibrio en la que se desplazará con la misma aceleración que el misil. La componente perpendicular a la barra de torsión de la aceleración vendrá dada sobre la masa del péndulo por una fuerza que por acción y reacción viene transmitida desde la unión con la barra de torsión sobre la que se manifiesta un torque de torsión que se compensa con la deformación experimentada por la barra de torsión, recuérdese la asignatura de "Resistencia de Materiales".

El torque de torsión vendrá dado por $K\phi$ donde K es una constante que depende de la barra y ϕ es su ángulo de torsión. Torque que, por acción y reacción, se puede considerar como debido a una fuerza de valor ma_x, donde m es la masa del péndulo y a_x es la aceleración en perpendicular al eje del péndulo que experimenta esa masa, actuando con un brazo l, donde l es la distancia entre el eje de la barra de torsión y el centro de masas del péndulo, con el que forma un ángulo $(\pi/2) - \phi$, véase la figura 7 del capítulo 7 del manual ACART-VA-011 (2009).

[3] Los raíles son conductores de la electricidad y el circuito se cierra a través de una unión con la masa. Al deslizar ésta sobre los raíles, cambia la resistencia total del circuito.

Recordando que $\text{sen}(\pi/2 - \phi) = \cos(\phi)$ e igualando se llega a

$$a_x = \frac{K\phi}{ml\cos\phi} \tag{2}$$

Puesto que se supone que la barra de torsión es elástica, su respuesta en torsión será la de un oscilador armónico simple. Se necesitará un amortiguador que reduzca la amplitud de las oscilaciones transitorias.

Si se repasa la figura 9 del capítulo 7 del manual ACART-VA-011 (2009), se puede ver que, en realidad, la componente perpendicular a la barra de torsión se corresponde con la proyección de la aceleración total sobre un plano y tiene dos componentes. Lo que de verdad se mide con un único acelerómetro de péndulo viene dado por

$$a_x\cos(\phi) - a_y\,\text{sen}(\phi) = \frac{K\phi}{ml} \tag{3}$$

y se necesitan tres acelerómetros para despejar todas las componentes de la aceleración a partir de un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas.

Referencias

ACART-VA-011 (2009). *ACART-VA-011. Unidad didáctica II. Sistemas de guía y control*. MADOC. Ministerio de Defensa, Biblioteca virtual del MADOC.