
NAVEGACIÓN INERCIAL DE UN SUBMARINO Y UNA NAVE ESPACIAL

♦ RESUMEN ♦

La navegación ha sido una herramienta fundamental para la exploración de nuevos horizontes, desde el descubrimiento de nuevos continentes hasta las próximas expediciones a Marte

La necesidad del ser humano por explorar obliga a desarrollar sistemas de navegación que desplazarse no sólo por la superficie de los océanos, sino también por las profundidades de éste y por el espacio interplanetario.

Bajo este contexto, se han percibido similitudes entre la navegación inercial de un submarino con una nave espacial.

Palabras claves: Navegación inercial, MEMS, filtro Kalman

SUBMARINE AND SPACECRAFT'S INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

♦ ABSTRACT ♦

Navigation has been a key tool for the exploration of new horizons, from the discovery of new continents to the future expeditions to Mars. The humans' urge to explore has forced them to develop navigation systems not only to sail the worlds oceans, but also their depths and the interplanetary space. In this context, some similarities have been discerned between a submarine's inertial navigation system and those of a spacecraft.

Keywords: Inertial navigation, MEMS, Kalman filter



ÁLVARO STUARDO GUTIÉRREZ

Teniente 1º

Submarino *Thomson*

Ingeniero Naval en Sistemas Navales, mención
Submarinos.

(astuardo@armada.cl@gmail.com)

La evolución de la navegación se ha caracterizado, entre otras cosas, por sus sistemas de referencia, donde inicialmente la referencia eran las estrellas y el sol, luego la situación se obtenía a través de la posición relativa respecto a un punto geográfico; sin embargo, en ocasiones no existían puntos notables para situarse, lo que obligó a navegar por estima, donde la posición se calcula a partir del producto de la velocidad ajustada en la nave por el tiempo recorrido entre situaciones.

Actualmente, la navegación por estima ha sido complementada con diferentes equipos y sistemas electrónicos para obtener la posición de la nave, dando origen a la navegación inercial, la cual permite, tanto a los submarinos y naves espaciales, navegar sin la necesidad de situarse permanentemente.

Particularmente los submarinos y las naves espaciales navegan de manera inercial, la cual:

está basada en acelerómetros y giróscopos, los primeros miden aceleración lineal y los segundos velocidad de giro en la nave en que van montados. Al medir solo aceleraciones y velocidades de giro no entregan directamente la posición, por lo que es requisito básico la situación inicial (Manual de Navegación, 2012).

En otras palabras, navegación inercial es la determinación de la posición actual a partir de mediciones internas dadas por acelerómetros que miden la aceleración permitiendo detectar el movimiento lineal a lo largo de su eje de movimiento, giróscopos

que miden los cambios de posición en cada uno de los ejes principales de la nave y un computador que realiza un proceso matemático de integración continua de variables, para calcular esta posición, donde al ingresar la aceleración se obtiene la velocidad y al integrar esta, se obtiene la distancia recorrida. Por ejemplo, si la plataforma inercial mide que la aceleración de un submarino en el eje X es de 2 m/s^2 , después de 1 s el computador deducirá que el submarino debe viajar a 2 m/s y debe haber recorrido 1 m desde su posición inicial.

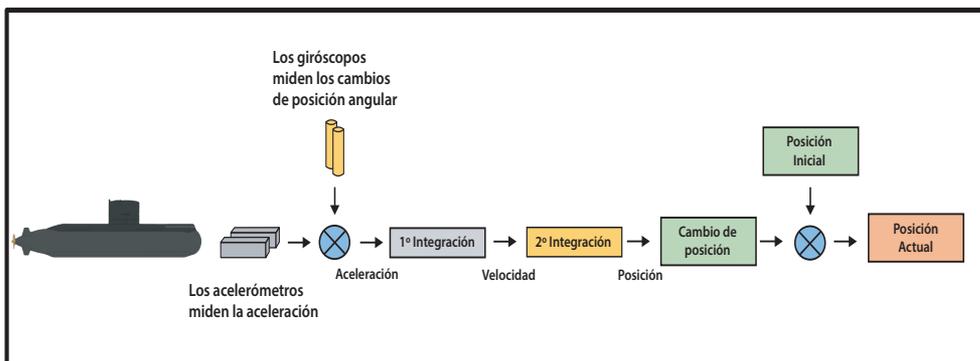
Esto mismo se repite de manera constante en los seis grados de libertad de la nave, que son "el número de aceleraciones y velocidades angulares que se pueden medir en un eje" (Rodríguez, 2012), los cuales son aceleración en *pitch*, aceleración en *roll*, aceleración en *yaw*, velocidad angular en *pitch*, velocidad angular en *roll* y velocidad angular en *yaw*.

En resumen, un sistema inercial es capaz de estimar la posición, velocidad y actitud (balance y cabeceo) de una nave sin la necesidad de una referencia externa.

Es importante señalar que todo este proceso debe tener una posición inicial, que será el punto de referencia al cual se le aplicará el proceso matemático mencionado anteriormente, para determinar la posición actual. Esta posición inicial puede obtenerse a través de distintos sistemas de referencia como navegación astronómica, situación GPS y situación visual a través de puntos geográficos notables, entre otros.

Navegación inercial de un submarino y una nave espacial

A. Stuardo



Los submarinos, sumergidos a una profundidad mayor a la de periscopio, están obligados a navegar inercialmente, dado que no cuentan con la posibilidad de obtener situación permanente, producto del medio donde operan. El equipo que permite efectuar este tipo de navegación es la plataforma inercial, la cual contiene los acelerómetros, giróscopos y unidades de procesamiento de datos que calcularán la posición estimada de la plataforma.

De la misma manera, las naves espaciales tripuladas y no tripuladas, también cuentan con sistemas de navegación inercial, plataformas inerciales, dado que al igual que los submarinos, no tienen la capacidad de situarse de manera permanente.

Similitudes

A continuación, se describirán algunas similitudes percibidas entre submarinos y naves espaciales, tripuladas y no tripuladas, desde el punto de vista de sus sistemas de navegación y sistemas de orientación y referencia.

○ Poco espacio disponible

El diseño de los submarinos y de las naves espaciales, no permite contar con gran cantidad de espacio volumétrico para la integración de equipos y sistemas, es por esta razón que las actuales plataformas inerciales están tendiendo a ser más pequeñas físicamente, con el propósito de optimizar el espacio y peso disponible al interior de la nave.

Este desafío ha obligado a desarrollar la tecnología MEMS (*Micro Electro Mechanical System*), como lo explica Keim:

son estructuras mecánicas integradas a circuitos eléctricos y electrónicos que resulta en un solo dispositivo físico con un tamaño mucho menor, pero con la misma funcionalidad, dado

que también están diseñados para soportar altos estándares de humedad, temperatura, vibraciones y ruido, entre otros (características militares), que permitan mantener la precisión durante altas horas de operación (Keim, 2018).

Por otra parte, esta tecnología potencia el uso de nanotecnología en sus circuitos electrónicos, permitiendo dejar de lado las antiguas tarjetas electrónicas, además del uso de materiales cerámicos para controlar las temperaturas y disminuir el peso del equipo.

Específicamente la tecnología MEMS está presente en las IMU (*Inercial Measurement Unit*) de las plataformas inerciales, que es el componente que contiene los acelerómetros y giróscopos.

○ Fusión sensorial de datos

Según el grupo de informática industrial e inteligencia industrial de la Universidad de Navarra, la fusión sensorial se sintetiza en un concepto que hace referencia a la integración de la información obtenida por distintos sensores para un objetivo determinado.

Conceptualmente, para que haya una fusión sensorial se requiere de sensores, interfaces y un algoritmo de control, que contenga el modelo matemático que permita integrar todas las señales que llegan a un computador común en distintos formatos, para luego ser distribuidos a actuadores u otros sistemas que requieran esta información.

Dado que la fusión sensorial integra y correlaciona la información de distintos sensores, no necesariamente significa que estos sensores medirán variables distintas, por ejemplo: en un submarino, la señal velocidad es obtenida desde el equipo corredera

(STW)¹ pero también del GPS (SOG),² ambas se integran para finalmente entregar una señal de velocidad única al resto del sistema de navegación del submarino.

Por otra parte, la fusión sensorial también incluye la correlación de una misma información, pero que ha sufrido alguna modificación en base a un determinado algoritmo, con el propósito de hacerla más exacta. Por ejemplo, el filtro *Kalman* (concepto que será detallado en el próximo punto) correlaciona el error en la posición de la nave (primer sensor) con un promedio de todos los errores de cada una de las situaciones anteriores (segundo sensor), objeto el error de la nueva posición se minimice.

Por otra parte, en una nave espacial existen sensores no convencionales que se relacionan con el control de su orientación y estabilidad. Respecto al primero, el control de su orientación consiste en el control de la actitud, que para determinarla, normalmente se emplean:

sensores giroscópicos que proporcionan medidas de desplazamiento y velocidad angular. Su consumo y masa son elevados, por lo que normalmente se utilizan en combinación con sensores no giroscópicos como pueden ser magnetómetros, sensores solares, sensores estelares o buscadores del horizonte terrestre (Pardo, 2008).

Tal como lo indica Pardo, los sensores estelares son dispositivos ópticos diseñados para determinar la dirección de las estrellas a través de la captación de la luz y, de esta manera, utilizarlas como puntos notables de orientación, este tipo de sensores al ser ópticos son considerados de precisión. También existen los sensores solares que actúan de la misma manera que los estelares,

pero captando la luz solar. Además, están los sensores terrestres que captan la luz proveniente del planeta Tierra.

En complemento a los sensores anteriores, existen los magnetómetros que son dispositivos que detectan las variaciones magnéticas de la Tierra para orientarse.

Toda la información recopilada por los sensores expuestos en los párrafos precedentes, son procesados de manera independiente, pero fusionados a través de un algoritmo integrador, que forma parte del software del sistema de navegación. Normalmente, un algoritmo de este tipo integra las distintas señales y datos provenientes de los sensores y procesa los errores inherentes a las mediciones de estos.

Por otra parte, en un submarino, el sistema de navegación está compuesto por diferentes sensores que contribuyen a la navegación inercial. Para determinar la posición inicial existe el GPS, el cual determina esta posición a través de la triangulación de satélites, la velocidad es proporcionada por la corredera (STW) y además por el GPS y la plataforma inercial (SOG). El rumbo verdadero lo determina el girocompás (HDG)³ y la plataforma inercial (COG)⁴, la profundidad es determinada por el sistema de medición de profundidad;⁵ lo anterior se complementa con un sistema de navegación electrónica que provee la cartografía y compila la información obtenida del resto de los sistemas.

La arquitectura de los sistemas de navegación más modernos, en términos de hardware, están compuestos por equipos de navegación autónomos, los cuales entregan señales redundantes a través de interfaces externas, las que son procesadas en un computador

1. STW: Speed Through Water. Velocidad a través del agua.

2. SOG: Speed Over Ground. Velocidad sobre la Tierra.

3. HDG: Heading. Diferencia angular entre el norte verdadero y la proa de la nave.

4. COG: Course Over Ground. Rumbo sobre la Tierra.

5. Sistema que permite medir la profundidad del submarino respecto a la superficie del mar, a través de sensores de presión existente en un conjunto de válvulas.

central que integra todas estas señales a través de un software común que permite visualizar, en tiempo real, la navegación del submarino en distintas pantallas, a veces en 3D.

○ Filtro *Kalman*

El filtro *Kalman* es:

un algoritmo que se basa en el modelo de espacio de estados de un sistema para estimar el futuro y la salida futura realizando un filtrado óptimo a la señal de salida y dependiendo del retraso de las muestras que se le ingresan, puede cumplir la función de estimador de parámetros o únicamente de filtro (Claro, 2017).

En otras palabras, el filtro *Kalman* es un algoritmo que permite predecir el estado de un sistema a partir de datos medidos previamente.

Los sistemas inerciales de los submarinos y de las naves espaciales utilizan este algoritmo. Pero la pregunta es ¿por qué estas naves utilizan esta herramienta?

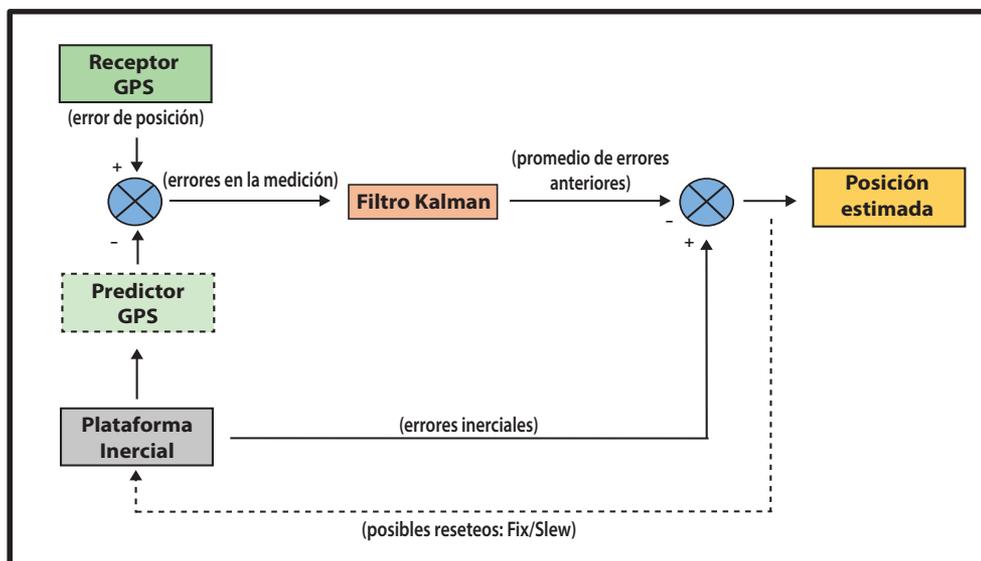
Tal como se mencionó en los párrafos anteriores, los sistemas de navegación se basan en un proceso

matemático que parte de una posición referencial, no obstante, el problema de estos sistemas es que para obtener la posición deben efectuar una doble integración numérica (aceleración y velocidad), lo cual genera que el resultado dependa de la exactitud en la posición inicial y de la magnitud de los errores de los acelerómetros y giróscopos, los cuales se integran dos veces, aumentando considerablemente el error en poco tiempo.

Si bien la posición referencial inicial puede ser muy precisa, el índice de actualización en la situación es muy baja, mientras que la limitación de una IMU es que su tasa de refresco es muy alta, lo que conlleva a que se acumulen muchos errores en el tiempo. Por lo tanto, para contrarrestar esta situación es que se utiliza el filtro *Kalman*.

De manera de ejemplificar lo anterior, a continuación, se muestra un diagrama en block del proceso de obtención de la señal de posición.

En términos prácticos, el algoritmo considera todos los errores de posición anteriores y los promedia con el error de posición actual, calculado por la IMU, estimando, de esta manera, la posición de la nave con un porcentaje



de error menor. A medida que pasa el tiempo de navegación inercial, el error en posición tiende a disminuir.

Diferencias

En los párrafos anteriores se describieron ciertas similitudes percibidas en los sistemas de navegación de los submarinos con el de los vehículos espaciales, ahora corresponde describir algunas diferencias observadas entre estos dos tipos de naves, desde el punto de vista de la navegación.

○ Fuerzas gravitacionales v/s corrientes marinas

Normalmente se cree que fuera de la atmósfera no existe gravedad, lo que aparentemente podría interpretarse como que una nave espacial (transbordador o satélite) se mantendría flotando en el espacio,

sin ninguna fuerza que la atraiga en ninguna dirección. Ahora bien, si analizamos una de las leyes de la física respecto a esto, la ley de gravitación universal (ley de gravedad) indica que "dos cuerpos se atraen con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa" (Fernández, J., 2021) podemos inferir que, mientras haya dos masas y estén separadas, siempre existirá una fuerza llamada fuerza de gravedad, por lo tanto las naves espaciales sí están afectadas por fuerzas gravitacionales, las que generan un vector en dirección al núcleo de la masa que la está afectando, la cual, generalmente, es la Tierra.

Pero entonces ¿cómo pareciera que los astronautas flotarían en el espacio?, la explicación es que tanto la nave espacial como el astronauta están



6. DSN: Deep Space Network. Red del Espacio Profundo.

siendo afectados por la misma fuerza de gravedad en dirección al centro de la Tierra, por lo tanto, se están acercando a la misma velocidad, es por esto que pareciera que el astronauta flotara. Por otra parte, indudablemente mientras más lejos la nave se encuentre del cuerpo celeste (en este caso de la Tierra), menor será la fuerza de gravedad, pero siempre existirá.

Por anterior, la navegación de una nave espacial estará afectada por una fuerza gravitacional, cuyo vector estará orientado al centro de la masa de atracción, el cual normalmente será la Tierra, la Luna o algún otro cuerpo celeste.

Ahora bien, para contrarrestar esta fuerza vectorial, es que existen los actuadores, que son dispositivos que permiten a la nave mantener su desplazamiento o navegación en la dirección y velocidad que se desea. Estos actuadores generalmente son booster que generan energía que permite controlar la trayectoria de la nave.

Por otra parte, los submarinos son naves que indudablemente están siendo afectados en todo momento por la fuerza gravitacional, la que es controlada estibando el submarino para dejarlo con una boyante neutra. Sin embargo, desde el punto de vista de fuerzas que desvían vectorialmente la navegación del submarino, la que más afecta, a juicio del autor, son las corrientes marinas.

○ Señales externas de referencia

Tal como se planteó en la introducción, la navegación inercial, requiere mandatoriamente de una posición de referencia.

Por una parte, los submarinos obtienen esta referencia situándose de manera visual a través de cortes de demarcación sobre un punto notable, mediante el uso del periscopio (situación visual), cortes de radar (situación de radar),

combinación de las dos anteriores (situación mixta) cuando se navega en cercanías de costa, o bien, mediante el empleo del GPS navegando en mar abierto, por lo tanto, los puntos de referencia para la navegación de un submarino son, faros, balizas, puntos notables de costa, satélites, entre otros.

En cambio, los puntos de referencia en el espacio corresponden a los cuerpos celestes, que representan los denominados puntos notables, pero ¿cómo es el proceso para obtener la situación cuando no se cuenta con sensores visuales ni satélites?

Lo anterior, se obtiene a través de sensores de sol, que según lo planteado por *AZoSensors*, son dispositivos que miden la intensidad y dirección del sol, permitiendo determinar la posición de la nave respecto al sol u otra fuente luminosa.

Lo anterior, se obtiene a través de dispositivos fotovoltaicos que detectan la demarcación e intensidad de la señal infrarroja irradiada de los distintos astros, cuyo proceso de triangulación de vectores es similar al utilizado en una situación visual del submarino.

○ Operación manual local v/s operación remota

El concepto de operación local v/s operación remota, hace referencia a las órdenes que otorgan a la nave la capacidad de desplazarse por el medio. Por una parte, las órdenes a los diferentes actuadores de un submarino (motor propulsor, hidroplanos y timón de dirección) son efectuadas de manera presencial dentro de la nave, mediante circuitos eléctricos (caso del motor propulsor) e hidráulicos (caso de los hidroplanos y timón) y controlados manualmente por un operador calificado.

Por otro lado, las órdenes a los actuadores de las naves espaciales, no tripuladas, son a través de comunicaciones electromagnéticas

desde estaciones en tierra, permitiendo variar la trayectoria a través de órdenes que desencadenarán un proceso mecánico, activando unos *booster* que finalmente modificarán la velocidad relativa y/o la dirección de la nave.

Existen esfuerzos por migrar al control autónomo de los actuadores y sistemas de posición, debido a que, según lo informado por la BBC, las actuales sondas, como el *Voyager 2*, que se encuentran orbitando en los límites del sistema solar, aun son capaces de establecer comunicaciones con las estaciones de control de tierra, sin embargo, en un futuro cercano, se buscarán horizontes a las afueras de nuestro sistema, donde la potencia de la onda electromagnética será incapaz de permitir la comunicación nave-estación de tierra, obligando a establecer un sistema de navegación y control automático de la nave espacial no tripulada.

diseño y, como se demostró en el presente artículo, ambos operan con sistemas de navegación similares, conceptualmente; no obstante, también es cierto que son naves con filosofías de operación totalmente distintas, por lo que naturalmente existe una infinidad de diferencias.

Indudablemente ambos tipos de naves ofrecen una oportunidad para el desarrollo de sistemas de navegación inercial, desafiando a ingenieros a diseñar nuevas tecnologías que permitan, por ejemplo, optimizar el espacio disponible de los sistemas de navegación a través de la explotación de la nanotecnología, crear algoritmos de control que permitan brindar una mayor precisión a la posición estimada y lograr que la relación sensor-posición-actuador sea autónoma mediante el empleo de inteligencia artificial.

En fin, el trabajo mancomunado entre ingenieros submarinistas y aeronáuticos de las naves espaciales podría llevar a la humanidad a descubrir nuevos horizontes, otorgándoles la responsabilidad de ingeniar los sistemas de navegación futuros que permitan descubrir nuevos horizontes.

Reflexiones finales

Algunos plantean que los submarinos son las naves espaciales del mar debido a que existen múltiples similitudes en su



LISTA DE REFERENCIAS

1. AZO Sensor s (2013). *What is a sun sensor*. <https://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=223>
2. BBCnews (2021). *Reportaje Voyager 2*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49497967>
3. Claro J. (2017). *Filtro Kalman. Fusión Sensorial de Acelerómetros y GPS*. Sevilla, España. Pág. 1.
4. *El sistema de navegación inercial (2015)*. <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/01/el-sistema-de-enagosto-de-1958-el.html>
5. Fernández, J. (2021). *Ley de gravitación universal*. <https://www.fisicalab.com/apartado/ley-gravitacion-universal>
6. Grupo de Informática Industrial e Inteligencia Artificial. *Fusión sensorial en robótica*. <https://web.ua.es/es/i3a/proyectos/percepcion-visual-y-fusion-sensorial-en-robotica.html>. Universidad de Alicante.
7. Keim, Robert (2018). *Introduction to MEMS (Microelectromechanical system)*. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-mems-microelectromechanical-systems/>
8. Krieger, J. (2021) *Imagen del fotoreceptor*. <https://www.spacetechnology.com/products/electronics-sensors/coarse-earth-sun-sensor-cess>
9. NASA (2020). *Deep Space Network*. <https://spaceplace.nasa.gov/dsn-antennas/sp/>
10. Pardo, J. (2008). *Control de Actitud de Satélites: Actuador Giroscópico Avanzado (AGA)*. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa* N° 19, Madrid, España. Pág. 18.
11. Rodríguez, N. (2012). *Variables Obtaining of Pitch, Roll, Yaw Angle Position of an Aircraft Through an Inertial Measurement Unit IMU Through Kalman Filter*. *Ciencia y tecnología aeronáutica*. Volumen 17, Bogotá, Colombia. Pág. 21.
12. SHOA (2012). *Manual de Navegación*. Pub. 3030, 4ta Edición, Valparaíso, Chile. Pág. 2.