

XXIV JORNADAS DE AUTOMATICA

León 10, 11 y 12 de septiembre de 2003

Universidad de León

E.II. INDUSTRIAL E INFORMÁTICA



Organizan:



UNIVERSIDAD
DE LEÓN



Colaboran:



MINISTERIO
DE CIENCIA Y
TECNOLOGIA



JUNTA DE
CASTILLA Y LEÓN



AYUNTAMIENTO
DE LEÓN



DIPUTACION
DE LEÓN

UN SISTEMA DE MEDIDA PARA ENSAYOS EN ENTORNOS ABIERTOS CON MODELOS A ESCALA DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Joaquín Aranda Almansa
Dpto. Informática y Automática, UNED (Madrid), jaranda@dia.uned.es

José Manuel Díaz Martínez
Dpto. Informática y Automática, UNED (Madrid), josema@dia.uned.es

Rocío Muñoz Mansilla
Dpto. Informática y Automática, UNED (Madrid), rmunoz@dia.uned.es

Resumen

Se ha desarrollado un software de navegación inercial para la realización de ensayos con un modelo a escala de un buque de alta velocidad, con el fin de estudiar el acoplamiento de movimientos y el control en 3 grados de libertad. El sistema de medida es una unidad de medida inercial que proporciona la velocidad angular y la aceleración en el sistema de coordenadas fijo al barco. La navegación inercial proporciona una medida de la posición, velocidad y orientación del barco en referencia a un sistema inercial. La transformación de coordenadas se implementa utilizando cuaterniones.

Palabras clave: Navegación inercial, unidad de medida inercial, acelerómetro, giróscopo, acoplamiento, actuadores, transformación de coordenadas, cuaterniones.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se navega en un buque de alta velocidad destinado al transporte de pasajeros, se debe procurar que la seguridad y el confort tanto de los pasajeros como de la tripulación sea lo más óptima posible. Uno de los inconvenientes más desagradables del transporte marítimo es sin duda el mareo que aparece como consecuencia de los distintos movimientos del barco: balanceo, cabeceo y arfada.

Por esta razón los constructores de barcos están muy interesados en conseguir controladores que controlen la acción de actuadores mecánicos diseñados para el amortiguamiento de los movimientos del balanceo, cabeceo y la arfada.

Un buque es un sistema multivariable complejo que actúa en un medio que introduce una gran variedad de perturbaciones (olas, vientos, corrientes, aguas

poco profundas,...,etc.). Es por esto que para conseguir el diseño de controladores se deben obtener modelos de la dinámica vertical de un buque, así como modelos de actuadores y perturbaciones.

Para la identificación y modelado de la dinámica vertical del buque [4], los equipos de investigación que trabajan en este proyecto han contado con una maqueta del buque a escala 1:25, y se han realizado ensayos con distintos tipos de ola, velocidades de buque y estados de la mar en el CEHIPAR (Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo). Estos modelos se han empleado para el diseño de diferentes métodos de control, como PID [1], robusto ó control QFT [2].

Con el fin de realizar una ampliación en el análisis de la dinámica del buque, y estudiar otros grados de libertad, se ha construido una nueva maqueta a escala 1:40 autopropulsada. Con este modelo se pretende en primer lugar desarrollar un software de *navegación inercial*, que nos proporcione en todo momento la posición y orientación del buque, con el fin de realizar un estudio del *acoplamiento* de los movimientos vertical (arfada y cabeceo) y de balanceo para la realización de un diseño de *controladores* que compense estos movimientos. Asimismo, y en último lugar, se pretende realizar un control de rumbo.

Para ello, y como sistema de medida empleado para los ensayos se ha adquirido una *unidad de medida inercial (IMU)*, que nos proporciona un conocimiento de la posición y orientación del buque sobre las tres direcciones en todo instante.

En este trabajo expondremos cómo es el modelo del sistema y actuadores, y haremos una descripción de la unidad de medida inercial y el software desarrollado para la navegación inercial..

2. MODELO DEL SISTEMA Y ACTUADORES

Tenemos un modelo físico a escala 1:40 del ferry, y pretendemos analizar el comportamiento en diferentes grados de libertad.

El modelo se interpreta como un sólido rígido con seis grados de libertad [5]. Para determinar la posición y orientación se necesita conocer el movimiento sobre las 6 coordenadas independientes (figura 1). Las tres primeras coordenadas corresponden a la posición y movimiento de translación a lo largo de los ejes x , y , z , y las otras tres coordenadas describen la orientación y movimiento rotacional. Para vehículos marinos, los 6 movimientos se definen como : surge, sway, heave, roll, pitch y yaw.

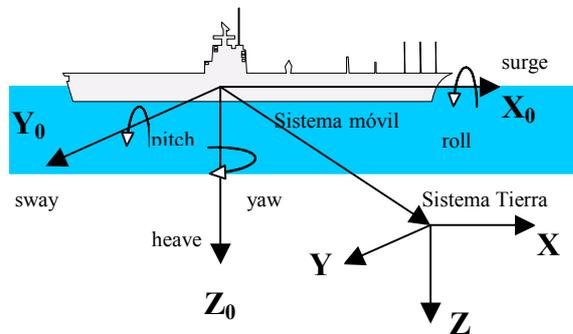


Figura 1. Sistema móvil y sistema Tierra

En el análisis del movimiento de vehículos marinos es conveniente definir dos sistemas de coordenadas. El primero $X_0Y_0Z_0$ es fijo al barco, y por tanto es el que está en movimiento. Se conoce como *sistema móvil*. El origen O de este sistema de coordenadas es el centro de gravedad, y los ejes coinciden con los ejes de inercia. El movimiento del sistema móvil debe describirse relativo a un sistema inercial, y que este caso es el sistema Tierra XYZ .

El objetivo de este trabajo es el conocimiento en todo momento de la posición y orientación del buque (navegación inercial), y el control en 3 grados de libertad de los movimientos heave, pitch y roll. De esta manera, necesitamos un sistema de medida que nos proporcione los valores de translación y rotación sobre las tres direcciones, y para ello contamos con la unidad de medida inercial.

La unidad de medida inercial nos da los valores de ángulos roll ϕ y pitch θ , aceleraciones a_x , a_y , a_z , y velocidades angulares ω_x , ω_y , ω_z sobre los tres ejes en el sistema móvil $X_0Y_0Z_0$.

Asimismo, para el control es necesario añadir al modelo del barco unos actuadores que consigan

reducir los movimientos y aceleraciones causantes del mareo. En [7] se realiza un estudio de la fuerza y momentos generados por las aletas. En este trabajo se cuenta con unos alerones en popa ó *flaps*, y unas aletas en proa ó *T-Foil* que generan una fuerza y momento sobre el barco que compensan el movimiento heave y pitch provocado por las perturbaciones (principalmente las olas), y unas aletas situadas a babor y estribor próximo al centro del barco que compensan el roll. Podemos ver un esquema en la figura 2.

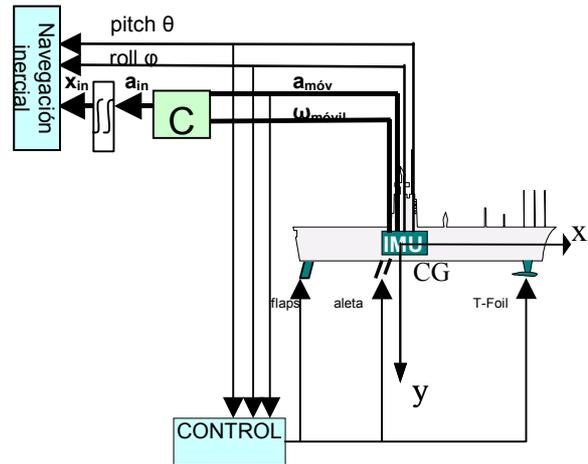


Figura 2. Sistema de medida y actuadores

3. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL

La forma básica de navegación que proporciona una medida de la posición, velocidad, orientación, y velocidad de rotación del vehículo es conocida como *navegación inercial* ([3],[6], [8]). Un *sistema de navegación inercial* (INS) consiste en:

- una *unidad de medida inercial* (IMU), que contiene un grupo de sensores inerciales:
 - Acelerómetros: miden la aceleración. No pueden medir la aceleración de la gravedad.
 - Giróscopos: miden la velocidad de rotación ó velocidad angular.
- un *computador inercial* que calcula la aceleración gravitacional (no medida por los acelerómetros), y hace una doble integración para mantener una estimación de la posición del vehículo.

La unidad de medida inercial que tenemos es un sistema ligado con tres acelerómetros y tres giróscopos. Por tanto, medirá la aceleración y velocidad angular en las tres direcciones del sistema de coordenadas.

La IMU adquirida es un sistema ligado ó *strapdown*, por tanto el grupo de sensores está fijo ó ligado al sistema de coordenadas del vehículo. A diferencia del otro tipo de sistemas, conocidos como *gimbaled*, los giróscopos no se utilizan para mantener los ejes de entrada de los acelerómetros estabilizados, sino que se emplean para obtener la transformación de coordenadas entre los ejes de entrada de los acelerómetros con respecto a unas direcciones estabilizadas virtualmente, en la forma de coordenadas de navegación.

3.1 Sistema de coordenadas de la IMU

La figura 3 presenta un esquema del sistema de coordenadas de la unidad de medida inercial. Si tenemos la cara frontal de la IMU que tiene el conector frente a nosotros, los ejes se definen de esta manera

Eje x: desde la cara con el conector a través de la IMU

Eje y: a lo largo de la cara del conector de izquierda a derecha

Eje z: a lo largo de la cara del conector de arriba hacia abajo.

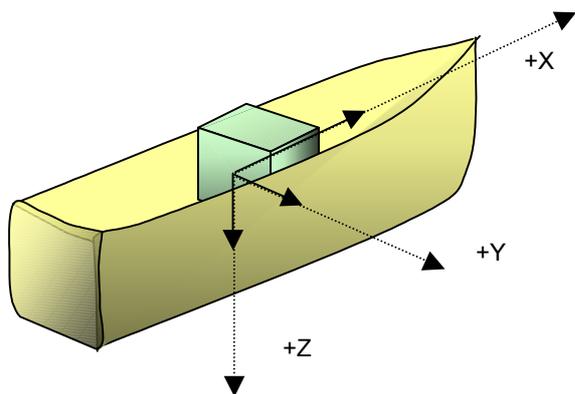


Figura 3. Coordenadas sistema móvil y IMU

La unidad de medida inercial irá situada en el buque haciendo coincidir el origen del sistema de coordenadas con el centro de gravedad CG del buque, y con los ejes X Y Z coincidentes.

3.2 Acelerómetros

Los tres acelerómetros son dispositivos que usan la capacitancia variable para sensar la aceleración.

Las salidas que devuelve son las aceleraciones lineales según las tres direcciones de los ejes de coordenadas de la IMU. La aceleración es positiva cuando la IMU es orientada hacia la cara positiva del eje de coordenadas.

La aceleración tiene un rango de $\pm 2G$, y un bias menor de $\pm 8mG$

3.3 Giróscopos

Los tres giróscopos son de fibra óptica, y emplean el efecto Sagnac para medir la velocidad angular independientemente de la aceleración.

Los tres sensores están alineados con los ejes xyz de la IMU, y miden las velocidades de rotación alrededor de estos ejes. La dirección de una rotación positiva está dada por la regla del pulgar.

La velocidad angular tiene un rango de ± 200 °/seg, y un bias menor de ± 0.03 °/seg.

4. ALGORITMO DE NAVEGACIÓN

Los valores de aceleración y velocidad angular que sensa la IMU son medidas referidas al sistema de coordenadas fijo al vehículo ó móvil (*sistema móvil $X_0Y_0Z_0$*). El movimiento del sistema móvil debe describirse referido a un sistema de referencia inercial (*sistema Tierra ó inercial XYZ*). En la navegación inercial, la posición y orientación del vehículo se describen relativos al sistema inercial, mientras que las velocidades lineal y angular deben ser expresadas en el sistema cuerpo.

De esta forma, deberemos conocer las ecuaciones cinemáticas que relacionan en cada instante el sistema cuerpo con el sistema inercial. Para conocer la posición del buque en todo momento, debe transformarse la aceleración en el sistema cuerpo al sistema inercial mediante una matriz de transformación, y luego realizar una doble integración. La orientación normalmente viene representada por los ángulos de Euler o por cuaterniones.

Las funciones software principales desarrolladas por un computador inercial para la navegación inercial se muestran en la figura 4. En nuestro caso, la implementación software de adquisición de datos y navegación del buque se ha realizado en lenguaje C++ bajo el entorno MS-DOS.

Así, podemos considerar la implementación de la navegación inercial en cinco bloques principales

- alineamiento inicial e inicialización
- modelo de la aceleración de la gravedad
- transformación de coordenadas mediante cuaterniones
- integración de la aceleración
- determinación de la orientación

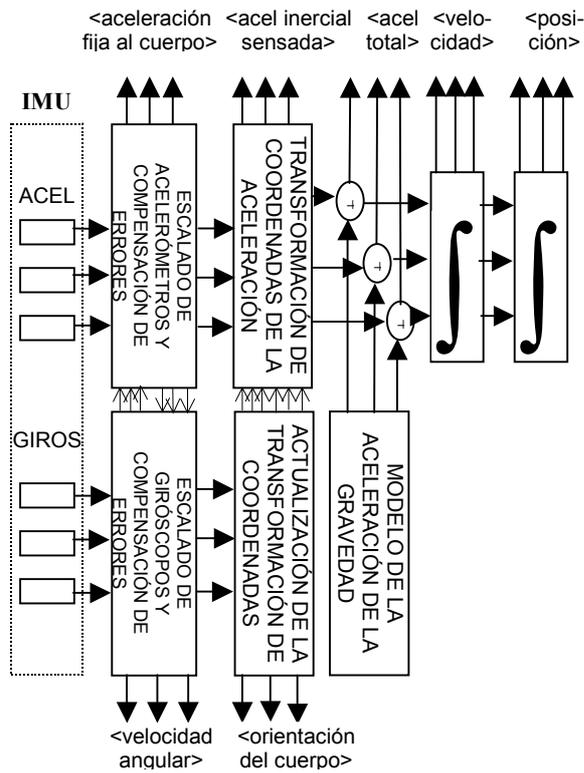


Figura 4. Algoritmo de navegación inercial

4.1 Alineamiento inicial e inicialización

El *alineamiento inicial* de INS consiste en la determinación de los valores iniciales de la transformación de coordenadas desde las coordenadas del sensor (sistema móvil) a coordenadas del sistema inercial de navegación (sistema Tierra). Por tanto, lo primero de todo es seleccionar cuál va a ser el sistema de referencia inercial de navegación.

Por simplicidad, vamos a considerar que el sistema de referencia fijo al cuerpo en el instante inicial, esto es, cuando el vehículo con la IMU está en reposo, coincide con el sistema de referencia inercial. De este modo, todas las medidas que se obtengan de velocidad y desplazamiento serán respecto a un sistema de referencia inercial imaginario situado en la posición original del buque.

Así, tendremos que la matriz de transformación inicial será la matriz unidad I .

La *inicialización* de INS es el proceso de determinar los valores iniciales de posición, velocidad y orientación del sistema en coordenadas de navegación.

Como inicialmente en $t=0$ sistema móvil y sistema inercial son coincidentes, la posición inicial en las tres direcciones y los tres ángulos roll, pitch y yaw

son cero. Asimismo, como el buque está en reposo, la velocidad inicial será igualmente cero en los tres ejes.

$$\begin{aligned} \vec{r}(t=0) &= [x(0), y(0), z(0)] = [0, 0, 0] \\ \vec{v}(t=0) &= [v_x(0), v_y(0), v_z(0)] = [0, 0, 0] \\ [\varphi(0), \theta(0), \psi(0)] &= [0, 0, 0] \end{aligned} \quad (1)$$

4.2 Modelo de la aceleración de la gravedad

La aceleración que la IMU sensa incluye la aceleración de la gravedad. De esta forma, cuando el buque está en reposo, la unidad está registrando una aceleración que es el valor de \mathbf{g} en ese punto de la Tierra, puesto que al no existir movimiento es la única aceleración que actúa sobre la unidad.

Si no se compensa \mathbf{g} , al tener una aceleración no nula, implicará una velocidad y un desplazamiento, cuando en realidad el barco está parado. Por tanto, se debe realizar una compensación ó corrección de \mathbf{g} para obtener cálculos buenos.

Así, lo primero es medir el valor de la gravedad cuando la IMU está en reposo, y de este modo se tendrá un modelo de la aceleración de la gravedad (figura 4) basándose en las medidas experimentales.

El modelo de \mathbf{g} se realiza a partir de los valores medios de las aceleraciones sobre los tres ejes sensadas con el barco en reposo. Como inicialmente el sistema de referencia móvil ligado al barco y el sistema inercial coinciden, \mathbf{g} será el mismo expresado en coordenadas del sensor y en coordenadas inerciales.

La compensación de la gravedad se realiza restando el vector \mathbf{g} a los valores de la aceleración medida y transformada al sistema de referencia inercial.

4.3. Transformación de coordenadas por cuaterniones

Consideramos $C_{inercial}^{móvil}$ la matriz de transformación de coordenadas fijas al cuerpo a coordenadas de navegación, $a_{móvil}$ el vector de la aceleración sensada en coordenadas del sistema cuerpo, y $a_{inercial}$ la aceleración del buque en coordenadas del sistema inercial de navegación. Se tiene que

$$a_{inercial} = C_{inercial}^{móvil} \cdot a_{móvil} \quad (2)$$

Hay muchas maneras de representar e implementar la transformación de coordenadas. Las más útiles son las matrices de transformación, ángulos de Euler, vectores de rotación y cuaterniones.

La representación de la matriz de transformación mediante ángulos de Euler resultan de gran atractivo, puesto que conforman un conjunto de tres parámetros que corresponden a tres cantidades bien conocidas, como son los tres ángulos roll, pitch y yaw del vehículo. Los inconvenientes que presenta son las singularidades y su carga computacional, pues requiere integración numérica de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales, que envuelven a su vez el cómputo de un gran número de funciones trigonométricas.

Por todo ello, para evitar estos problemas, elegimos para implementar la transformación de coordenadas la fórmula de rotación de los **cuaterniones**.

4.3.1 Definición de cuaternión

Un cuaternión es definido como un número complejo

$$Q = q_0 + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k} \quad (3)$$

Formado por cuatro parámetros q_i , y donde \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} son tres vectores unidad ortogonales.

4.3.2 Matriz de transformación

La matriz de transformación $C_{inercial}^{móvil}(q)$ que transforma el sistema de coordenadas cuerpo al sistema inercial, implementado a partir de cuaterniones es

$$C_{inercial}^{móvil} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_0q_3 + q_1q_2) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

4.3.3 Ritmo de cambio de los cuaterniones

El buque está continuamente en movimiento. Por tanto, la posición del sistema móvil respecto al sistema inercial estará en todo momento variando, por lo que la matriz de transformación cambiará en función de esta evolución.

Así, para conocer en cada instante el valor de la matriz de transformación se necesita conocer el valor de los cuaterniones para todo tiempo.

A partir de la expresión que relaciona la derivada de un vector en un sistema móvil con su derivada en un sistema fijo, se llega para los cuaterniones que

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \omega Q \quad (5)$$

donde Q es el cuaternión y $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ es la velocidad angular roll, pitch, y yaw.

Hacemos un desarrollo de Taylor para obtener un forma de cálculo recursiva y poder mecanizar la computación. Nos quedamos con el desarrollo de primer orden

$$Q(t + \Delta t) = Q(t) + \dot{Q}(t)\Delta t = Q(t) + \frac{1}{2} \omega Q \Delta t \quad (6)$$

donde Δt es el tiempo de muestreo.

Si expresamos la ecuación (6) en forma matricial, tenemos finalmente

$$\begin{pmatrix} q_0(t + \Delta t) \\ q_1(t + \Delta t) \\ q_2(t + \Delta t) \\ q_3(t + \Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_0(t) \\ q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \Delta t \quad (7)$$

4.3.4 Valor inicial del cuaternión

Para conocer el valor de los parámetros del cuaternión en el instante $\Delta t + t$, se necesita conocer su valor en el instante anterior t . Por tanto, se debe conocer el valor de Q en el instante inicial $t=0$.

Se conocen los valores iniciales de posición (X, Y, Z) y de orientación (roll, pitch, yaw). La expresión que relaciona los ángulos de Euler con los cuaterniones, y que permite conocer $Q(0)$ es la siguiente

$$\begin{aligned} q_0 &= \cos(\psi/2)\cos(\theta/2)\cos(\phi/2) + \sin(\psi/2)\sin(\theta/2)\sin(\phi/2) \\ q_1 &= \cos(\psi/2)\cos(\theta/2)\sin(\phi/2) - \sin(\psi/2)\sin(\theta/2)\cos(\phi/2) \\ q_2 &= \cos(\psi/2)\sin(\theta/2)\cos(\phi/2) + \sin(\psi/2)\cos(\theta/2)\sin(\phi/2) \\ q_3 &= -\cos(\psi/2)\sin(\theta/2)\sin(\phi/2) + \sin(\psi/2)\cos(\theta/2)\cos(\phi/2) \end{aligned} \quad (8)$$

4.4 Determinación de la posición. Integración de la aceleración

Se tiene la aceleración en el sistema de coordenadas inercial $\mathbf{a}_{inercial}$. Para determinar la posición del buque, se debe realizar una doble integración. La primera integración dará la velocidad. Para hacer la integración numérica, se emplea la fórmula trapezoidal de Newton-Cotes.

$$\vec{v}(t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \vec{a}_{inercial}(t) dt = \Delta t \left[\frac{1}{2} \vec{a}(t_0) + \frac{1}{2} \vec{a}(t_1) \right] + O(\Delta t^3 a'') \quad (9)$$

donde Δt es el tiempo de muestreo $t_1 - t_0$.

El algoritmo de integración que se emplea en el software es, para cada dirección

$$v_i(k) = v_i(k-1) + \frac{\Delta t}{2} (a_i(k-1) + a_i(k)) \quad i = x, y, z \quad (10)$$

Y para la posición

$$\vec{r} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{v}_{inercial}(t) dt = \Delta t \left[\frac{1}{2} \vec{v}(t_0) + \frac{1}{2} \vec{v}(t_1) \right] + O(\Delta t^3 v'') \quad (11)$$

$$r_i(k) = r_i(k-1) + \frac{\Delta t}{2} (v_i(k-1) + v_i(k)) \quad i = x, y, z \quad (12)$$

4.5 Determinación de la orientación

La orientación en cada instante viene dada por el valor del cuaternión Q que se obtiene por la expresión (7). Para conocer la orientación en forma de ángulos de Euler roll φ , pitch θ y yaw ψ , se necesita conocer la relación que hay entre ellos.

Para ello, se impone que las matrices de rotación en las dos representaciones sean iguales. Sea $J(\varphi, \theta, \psi)$ la matriz de rotación en ángulos de Euler, y $C_{inercial}^{móvil}(q)$ la matriz conocida de rotación de cuaterniones, donde C_{ij} es el elemento de la fila i y columna j de esta matriz. Se tiene así que

$$J(\varphi, \theta, \psi) \equiv C_{inercial}^{móvil}(q) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \rho \theta & -s \psi \alpha \rho + \alpha \psi \delta \rho & s \psi \delta \rho + \alpha \psi \alpha \rho \theta \\ s \rho \theta & \alpha \psi \alpha \rho + s \rho \delta \psi & -\alpha \psi \delta \rho + s \delta \psi \rho \\ -s \theta & \delta \theta \rho & \delta \alpha \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Una solución a la expresión anterior

$$\begin{aligned} \varphi &= a \tan 2(C_{32}, C_{33}) \\ \theta &= -a \sin(C_{31}) \\ \psi &= a \tan 2(C_{21}, C_{11}) \end{aligned} \quad (15)$$

5. MUESTRA DE ENSAYO

Aquí se muestran las medidas registradas en un ensayo de desplazamiento lateral según la dirección Y.

El archivo de datos "res_imu.dat" es el que contiene los datos de velocidad angular y aceleración sensados por la unidad y los datos procesados por el software: velocidades angulares y aceleraciones sin bias y filtradas, y velocidades lineales y posición en el sistema inercial.

En este ensayo, la IMU estará registrando medidas con el barco en reposo durante los primeros 90 segundos para calcular las medias de ω y \mathbf{a} . Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1.

$\omega_x = -0.023$ °/s	$\omega_y = 0.027$ °/s	$\omega_z = 0.014$ °/s
$\mathbf{g}_x = -9.8 \cdot 10^{-3}$ G	$\mathbf{g}_y = -4.4 \cdot 10^{-4}$ G	$\mathbf{g}_z = 9.9 \cdot 10^{-1}$ G

Tabla 1. valores medios de ω y \mathbf{g}

Estos valores medios se interpretan como el bias de ω , y como el valor de la aceleración de la gravedad \mathbf{g} , y que compensarán los valores sensados cuando el barco esté en movimiento.

Una vez determinados los valores medios, el barco comienza a moverse y empieza la navegación inercial.

5.1. Velocidad angular

La velocidad angular que mide directamente la unidad contiene ruido y por ello se añade al software un filtro paso bajo de primer orden. La figura 5 muestra ω_x , ω_y , ω_z filtradas y compensadas con el bias.

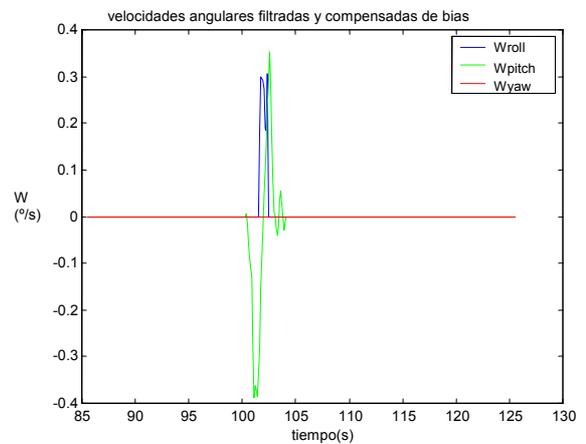


Figura 5. Velocidad angular filtrada y compensada con el bias

5.2. Aceleración

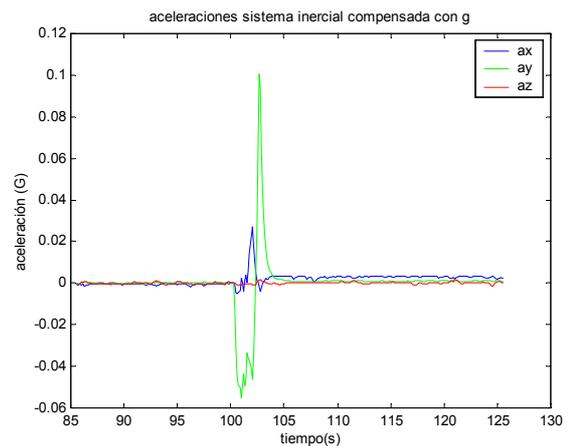


Figura 6. Aceleración sistema inercial compensada con \mathbf{g} .

La figura 6 muestra los valores de a_x , a_y , a_z en [G] filtradas, transformada al sistema inercial y compensada con la gravedad \mathbf{g} . El sistema inercial

fijado es el sistema de coordenadas original en la posición inicial del barco.

Se ve que, a pesar de que el movimiento es en la dirección Y, hay una pequeña componente en la dirección X.

5.3 Velocidad

La figura 7 muestra la velocidad v_x , v_y , v_z en [m/s] en el sistema inercial. Aquí se ve claramente cómo inicialmente el barco está en reposo, luego comienza a desplazarse en la dirección *pitch* y a continuación cómo se va parando. Además, existe cierto movimiento *surge*. No hay movimiento *heave*.

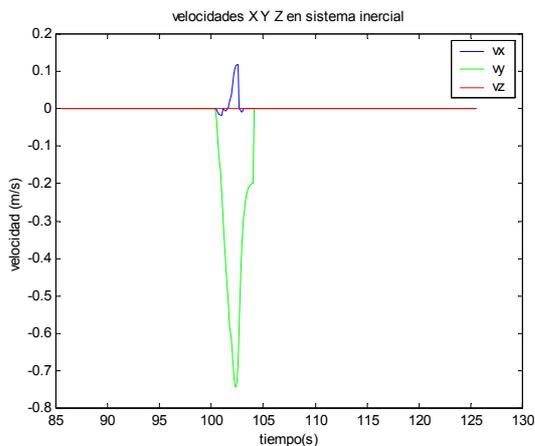


Figura 7. Velocidad sistema inercial

5.4 Posición

La figura 8 muestra la gráfica de la posición x , y z [m]. El barco se ha desplazado 1.4 m *pitch* y 0.1m *surge*.

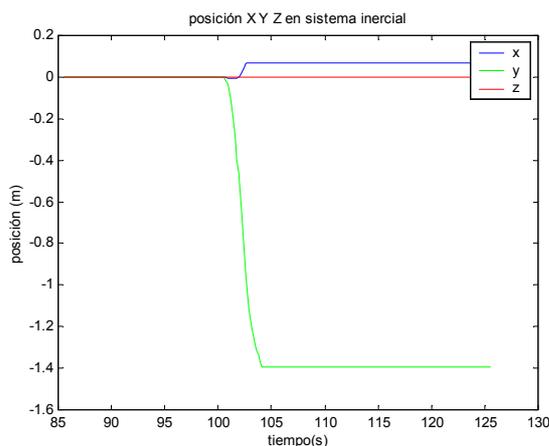


Figura 8. Posición.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el sistema de medida adquirido para la navegación inercial de un modelo a escala 1:40 de un buque de alta velocidad. El sistema de medida es una unidad de medida inercial, que consiste en un grupo de tres giróscopos y tres acelerómetros que proporcionan los valores de la velocidad angular y aceleración lineal en el sistema de coordenadas fijo al vehículo.

La finalidad del trabajo es el desarrollo de un software que proporcione en todo momento la posición y orientación del vehículo, con el fin de estudiar el acoplamiento de movimientos y el control en 3 grados de libertad para heave, pitch y roll. Para el diseño de control se han fabricado una serie de actuadores, T-Foil en proa, flaps en popa y aletas centrales que ayudan a amortiguar estos movimiento causantes del mareo.

Para conocer en todo instante el valor de la posición y orientación en un sistema de referencia inercial, se necesita saber cuál es la relación de transformación de coordenadas del sistema móvil al sistema inercial. Una vez que se conoce el valor de la aceleración en el sistema inercial, se realiza una doble integración que nos devuelve el valor de la posición. La orientación se determina expresada en cuaterniones, que se transforma finalmente a ángulos de Euler. A su vez, la IMU mide los valores de roll y pitch.

Finalmente, se ha presentado el algoritmo de computación que se ha implementado para la navegación inercial. El esquema es el siguiente

1. $k=0$. Computar valores iniciales de posición $\mathbf{r}(k)$ y orientación $Q(k)$.

2. transformación de coordenadas

$$a_{inercial}(k) = C_{inercial}^{móvil}(q(k)) \cdot a_{móvil}(k)$$

3. integración

$$v_i(k) = v_i(k-1) + \frac{h}{2}(a_i(k-1) + a_i(k)) \quad i = x, y, z$$

$$r_i(k) = r_i(k-1) + \frac{h}{2}(v_i(k-1) + v_i(k)) \quad i = x, y, z$$

4. actualización del cuaternión

$$Q(k+1) = Q(k) + \frac{h}{2} E\omega$$

5. normalización

$$Q(k+1) = \frac{Q(k+1)}{\|Q(k+1)\|}$$

6. $k = k + 1$. Vuelve a 2

El software se ha desarrollado en lenguaje C++ bajo MS-DOS. Se han realizado diferentes pruebas que han comprobado que el algoritmo de navegación da resultados satisfactorios.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aranda, J., J.M. Díaz, P. Ruipérez, T.M. Rueda, E. López. (2002a). Decreasing of the motion sickness incidence by a multivariable classic control for a high speed ferry. *CAMS Proceeding Volume*. Pergamon Press.
- [2] Aranda, J., J.M de la Cruz, J.M. Díaz, S. Dormido Canto (2002b). QFT versus classical gain scheduling: study for a fast ferry. *15th IFAC World Congress b'02*.
- [3] Chatfield, Averil B. (1997). *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*, Volume 174, Progress in Astronautics Aeronautics.
- [4] Cruz, J.M de la, J. Aranda, B. de Andrés, P. Ruipérez, J.M. Díaz, A. Marón. (2000). Identification of the vertical plane Motion Model of a High Speed craft by Model Testing in Irregular waves In: *CAMS Proceeding Volume*. (K.Kijima, T.I. Fossen) 257-262. Pergamon Press.
- [5] Fossen, T.I., (1994). *Guidance and Control of Ocena Vehicles*. John Wiley & sons.
- [6] Grewal, Mohinder S., (2001). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. A Jon Wiley & Son, Inc. Publication.
- [7] Lewis, E.V., (1989). *Principles of Naval Architecture*. Volume III. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [8] Ling, Frederick F., (1998), *Modern Inertial Technology*, Second Edition, Springer.