

Modelo predictivo de comportamiento de barcos

Boroni G., Vénere M., Lotito P., Clausse A.
Universidad Nacional del Centro, Tandil, Pcia. de Buenos Aires
{gboroni,venerem,plotito,clausse@exa.unicen.edu.ar}

Martinetti Osvaldo D.

Jefe del Servicio de Análisis Operativos Armas y Guerra Electrónica, Armada Argentina

Grasso Oscar P.

Jefe dpto. Tecnología de la Información, Armada Argentina

{opgrasso@ciudad.com.ar}

Resumen: el problema de simular los movimientos y la dinámica de un barco es estudiado principalmente para el desarrollo de simuladores de maniobra y entrenamiento. En general existen varios niveles posibles de solución, con diversos grados de complejidad y de exactitud. No obstante, todas las soluciones basadas en modelos matemáticos conducen naturalmente a dos acercamientos básicos: modelos dinámicos de desplazamiento, y modelos cinemáticos de predicción. En este trabajo se presenta el desarrollo de un nuevo modelo matemático simplificado, que permite predecir la dinámica de maniobra y la cinemática de movimiento, en base a las características del barco, y a los valores de velocidades y aceleraciones instantáneas.

Introducción

La mayoría de los modelos matemáticos modernos de comportamientos de buques usados en simuladores, se construyen según el principio modular, es decir, incluyen sub-modelos separados para los distintos componentes: el casco, el timón, el motor, etc. (Inoue 1981, Crane 1989 y Chislett 1996). Cada sub-modelo contiene generalmente fórmulas empíricas para la descripción de componentes de fuerzas y de momentos. Todo esto agrega flexibilidad a los modelos y mejora la velocidad de cómputo.

Para convertir un modelo dinámico de maniobra complejo en un modelo rápido, es razonable simplificar los más sofisticado, eliminando todas las características y efectos menos importantes (Degre 1998). Las siguientes consideraciones podrán ser discutidas para obtener dicha simplificación:

- El movimiento de rolido puede afectar sensiblemente en las maniobras. Este efecto en la mayoría de los casos es débil, y puede ser sacrificado fácilmente.
- La inercia del motor es mucho más baja que la inercia de la nave misma, y se puede descartar bajo el supuesto de que la velocidad de rotación del propulsor puede cambiar inmediatamente.
- Se puede crear un modelo matemático conveniente para las fuerzas longitudinales (Inoue 1981), pero con representaciones simplificadas para la resistencia de la nave y para la fuerza de la oleada inducida por el timón.
- La dinámica del engranaje de manejo puede también ser descuidada en muchos casos, pero su presencia es altamente deseable cuando se considera la simulación de control automático.
- Es deseable proveer en el modelo de leyes de control para la ejecución maniobras típicas.

En la sección siguiente se presenta un modelo de comportamiento de barcos, que combina un sub-modelo cinemático de desplazamiento, ecuaciones de control para la aceleración tangencial y ángulo del timón, y un sub-modelo de levantamiento y cabeceo.

Modelo para el desplazamiento horizontal del barco

Considerando según la figura 1 que el origen C es el centro de masa del barco, el modelo simplificado propuesto maneja las siguientes variables en el intervalo de tiempo $t \in [t_p, t_p + T_p]$

- ψ es el ángulo que forma el barco con el eje x ;
- ξ es la componente x de la posición del barco;
- η es la componente y de la posición del barco;
- u es la componente x de la velocidad del barco;
- v es la componente y de la velocidad del barco;
- r es la velocidad tangencial del barco.

Considerando el efecto de las aceleraciones en cada una de las componentes de velocidades, y t el tiempo actual, el modelo cinemático de desplazamiento propuesto es

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_{t_p} + r_{t_p} (t - t_p) & \xi &= \xi_{t_p} + v_{t_p} (t - t_p) & r &= a_{t_p} (t - t_p) \\ \eta &= \eta_{t_p} + u_{t_p} (t - t_p) & V &= V_{t_p} + a_b (t - t_p) \\ u &= V_{t_p} \cos(\psi) & v &= V_{t_p} \sin(\psi) \end{aligned} \quad (1)$$

donde

- V_{t_p} es la velocidad del barco;
- a_{t_p} es la aceleración tangencial;
- a_{b,t_p} es la aceleración del barco.

El subíndice t_p se refiere a los valores obtenidos en dicho tiempo. Como se mencionó anteriormente, las Ecs. 1 se pueden complementar con leyes de control, representando un piloto automático o un operador humano (Sutulo 2002). Por ejemplo, para el cambio de curso de maniobra, la ley de control es:

$$\delta = f(\psi, \dot{\psi}, \xi_c, \dot{\xi}_c, \eta_c, \dot{\eta}_c, u, v, \dots), \quad (2)$$

donde se pueden introducir parámetros adicionales de acuerdo a la complejidad esperada del modelo. En base a lo anterior, se propone agregar al modelo (1) las ecuaciones de control para representar la aceleración tangencial a_{t_p} y el ángulo de inclinación del barco δ_b

$$a_{t_p} = C_b \delta_T (t + \rho) V_{t_p} / \varepsilon_m L \quad \delta_b = -C_i \delta_T (t + \rho) V_{t_p} / \varepsilon_m L, \quad (3)$$

donde

- ε_m máxima velocidad de giro del timón;
- L es la longitud del barco;
- δ_T es el ángulo del timón;
- C_b es el coeficiente de ajuste de aceleración del timón;
- C_i es el coeficiente de ajuste de inclinación del barco;
- ρ es el coeficiente de retardo.

A partir de las Ec. 3, se obtiene que la aceleración tangencial y el ángulo de inclinación del barco son proporcionales a la velocidad del barco, e inversamente proporcional a la longitud del mismo. Se puede ver que cuando la velocidad V_p es 0, no hay aceleración tangencial, y además el barco no se inclina por efecto de una maniobra de giro.

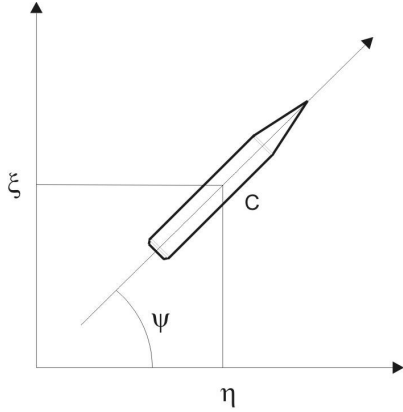


Fig. 1. Esquema de variables y parámetros del modelo.

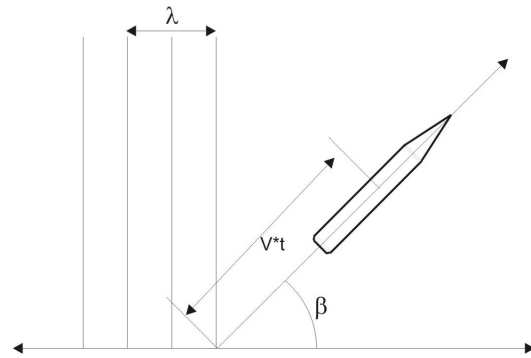


Fig. 2. Movimiento relativo de las olas respecto del barco que avanza con velocidad V .

Modelo para el levantamiento y cabeceo del barco

Considerar que las olas se aproximan al buque desde cualquier ángulo β respecto de la dirección de su movimiento (ver figura 2), y con diferentes frecuencias; para un observador que avanza con el buque a velocidad V , las olas se las recibe con una frecuencia de encuentro dada por

$$\omega_e = \omega_0 - kV \cos \beta, \quad (4)$$

donde

- $\omega_0 = \sqrt{kg}$ es la frecuencia propia de la ola;
- λ es la longitud de la ola;
- $k = 2\pi/\lambda$ es el número de la ola.

La función que describe la superficie de la ola de amplitud a , esta dada por

$$\eta(x, y, t) = a \sin[k(x \cos \beta + y \sin \beta) + \omega_e t], \quad (5)$$

donde las coordenadas (x, y) especifican un punto de la superficie del mar, respecto del sistema que se desplaza con el barco. Despreciando el ancho de la cubierta en proa, la ecuación 5 representa la elevación de la superficie en el punto (x, y) .

En este trabajo se ha restringido al caso olas de proa ($\beta = 180$), debido que se considera más alta la exigencia en lo que se refiere a respuesta vertical. Esto a su vez va a producir la mayor posibilidad de que la cubierta se sumerja en la superficie del mar. Luego, las ecuaciones 4 y 5 se transforman en

$$\omega_e = \omega_0 + kV \quad \eta_{proa}(t) = a \sin[kL/2 + \omega_e t]. \quad (6)$$

Al igual que la ecuación 6, las características asociadas al levantamiento z y cabeceo θ se pueden modelar respecto de la frecuencia de encuentro con las olas (figura 3)

$$z(t) = z_0 \sin(\omega_e t + \gamma) \quad \theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_e t + \varphi). \quad (7)$$

Muchas veces resulta conveniente calcular el movimiento relativo de la proa del barco, en función de la elevación de la superficie del mar. A partir de las ecs. 6 y 7 es posible calcular dicha medida

$$w(t) = -z(t) + x_{proa}(t) - \eta_{proa}(t). \quad (8)$$

La estructura modular del modelo matemático propuesto, permite incorporar nuevas características y sub-modelos dependiendo de la necesidad de exactitud en la predicción.

Resultado numéricos

El primer caso de estudio es un análisis predictivo de desplazamiento del barco. Para ello se simuló el modelo completo para $t \in [0, 500]$, aplicando los eventos temporales declarados en la tabla 1. En la figura 4 se grafica la posición del barco (x, y) en función del tiempo. En dicha figura se puede ver que a medida que se incrementa la velocidad del barco, aumenta la aceleración tangencial.

En el segundo caso de estudio se analizó el movimiento relativo de la proa según las ecuaciones 6, 7 y 8. Los valores iniciales utilizados se presentan en la tabla 2. En la figura 5 se muestra como varían respecto de la frecuencia de encuentro de las olas, un punto definido por w +francobordo (francobordo es la distancia entre proa y línea de flotación), y la elevación de la superficie $\eta_{proa}(t)$. En dicha figura se puede ver que la diferencia mínima entre ambas medidas es de 0.5m, con lo cual la cubierta del barco no llega a sumergirse en el mar.

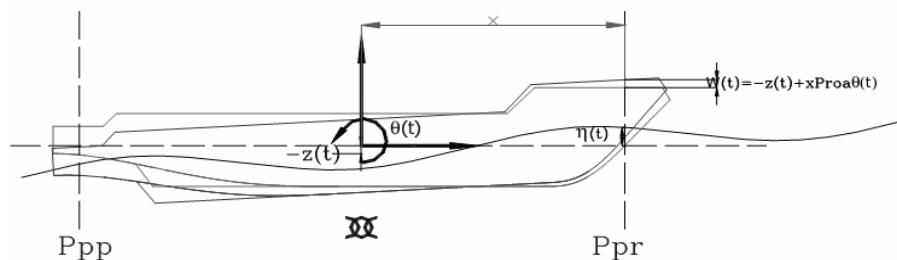


Fig. 3. Movimiento relativo de la proa.

| Tiempo | $a_{b,p}$ | δ_T |
|---|-----------|------------|
| $100*k \leq t \leq 50 + (100*k), k=0,1,2..$ | 0.005 | 0.9 |
| otro | 0 | 0 |

Tabla 1.

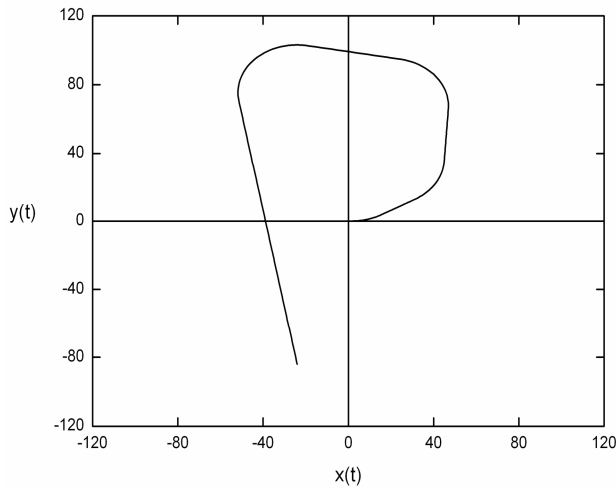


Fig. 4. Posición del barco (x,y) en función del tiempo.

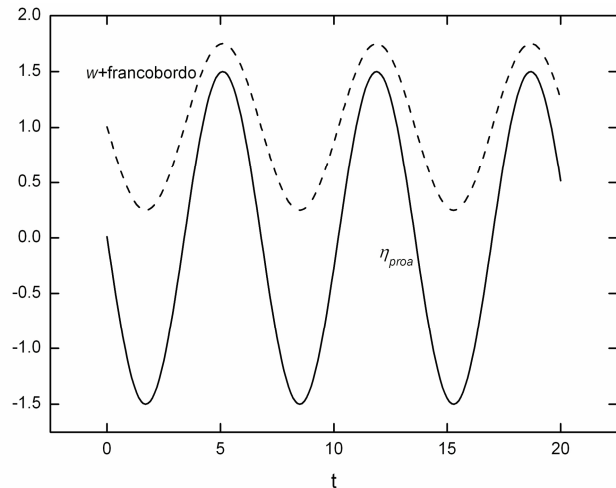


Fig. 5. $w+\text{francobordo}$ y $\eta_{\text{proa}}(t)$ respecto de la frecuencia de encuentro de la ola.

| Variable/constante | Valor |
|--------------------|------------------|
| λ | 30 |
| k | $2\pi / \lambda$ |
| a | 1 |
| ω_0 | 0.8 |
| θ_0 | 0.5 |
| z_0 | 0.5 |
| φ | 0 |
| γ | 0 |

Tabla 2.

Referencias

1. Sutulo S., Moreira L., Guedes Soares C., 2002. Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. *Ocean Engineering* 29, pp 1–19.
2. Chislett, M.S., 1996. A generalised math model for manoeuvring. In: Chislett, M.S. (Ed.), *Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 593–606.
3. Crane, C.L., Eda, H. and Landsburg, A., 1989. Controllability. In: Lewis, E.V. (Ed.), *Principles of naval architecture*, vol. 3, Jersey City, SNAME, pp. 191–365.
4. Degre, T., Guedes Soares, C., 1998. Ship's movement prediction in the Maritime Traffic Image Advanced System (MATIAS). In: Sciutto, G., Brebbia, C.A. (Eds.), *Maritime Engineering and Ports*. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 207–216.
5. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., Takashina, J., 1981a. A practical calculation method of ship maneuvering motion. *International Shipbuilding Progress* 28 (325), 207–222.
6. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., 1981b. Hydrodynamic derivatives on ship maneuvering. *Internacional Shipbuilding Progress* 28 (321), 112–125.