

ESTUDIO DE MANIOBRABILIDAD DE UN UUV

UUV maneuverability study

José María Riola¹
Francisco Jesús Velasco²
Elías Revestido³

Recibido: 11/08/2017

Aceptado: 10/07/2018

Resumen

El objeto de este trabajo es mostrar el estado del arte de las técnicas de control de maniobrabilidad, sus algoritmos correspondientes y los equipos necesarios para poder dotar a los vehículos submarinos no tripulados UUV (*Unmanned Underwater Vehicles*) de unas elevadas capacidades de navegación autónoma. En este sentido, se procede a definir los parámetros necesarios para llevar a cabo el modelado del comportamiento del vehículo como primer paso antes de definir los procedimientos de navegación autónoma para entornos submarinos no estructurados, entendidos como aquellos de los que no se dispone de ninguna información a priori, sólo basados en la información proporcionada por un conjunto de sensores tales como los sistemas inerciales de a bordo, GPS, sistemas de posicionamiento acústico,

sonar, etc. Los ensayos realizados se han llevado a cabo en El Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) España.

Palabras clave: UUV, automática, maniobrabilidad, control, algoritmos, CEHIPAR.

Abstract

The aim of this work is to show the state of the art of maneuverability control techniques, their corresponding algorithms and the equipment necessary to provide Unmanned Underwater Vehicles with a high capacity for autonomous navigation. In this sense, the necessary parameters are defined to carry out the modeling of the vehicle behavior as a first step before defining the autonomous navigation procedures for unstructured submarine environments, understood as

¹Universidad Politécnica de Madrid, Ph.D., Ingeniero Naval - josemaria.riola@upm.es

²Universidad de Cantabria, Ph.D., en Ciencias Físicas - velascof@unican.es

³Universidad de Cantabria, Ingeniero Industrial - revestidoe@unican.es

those for which no a priori information is available, based only on the information provided by a set of sensors such as inertial on-board systems, GPS, acoustic positioning systems, sonar, etc. The tests carried out have been carried out in El

Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR), Spain.

Keywords: UUV, automatic, maneuverability, control, algorithms, CEHIPAR.

Introducción

Actualmente, nos podemos encontrar con vehículos submarinos autónomos capaces de trabajar desde aguas poco profundas hasta grandes profundidades cercanas a los 3 kilómetros y están equipados con diferentes cargas útiles de pago y sensores para la captación de imágenes y empleados para llevar a cabo levantamientos batimétricos de precisión, sonar de barrido lateral, sistemas de evasión de obstáculos, ente otros. Es el uso militar el que con más fuerza está tirando de esta tecnología de ámbito naval en los últimos años, donde su integración en los buques de la flota constituirán una nueva generación de operaciones como son el desminado de rutas, apoyo a la sensorización, guerra antisubmarina, guerra electrónica, defensa perimetral o apoyo a fuerzas de operaciones especiales, entre otras. Así, en los últimos años las operaciones combinadas de UUVs con diferentes plataformas, como sus enjambres “swarms” han incidido en el reconocimiento del entorno basado en la información sensorial; el diseño de algoritmos de control de la dinámica del vehículo; la generación de trayectorias y el control de seguimiento de las mismas. Con objeto de desarrollar un sistema de control, la identificación de modelos de maniobra no-lineales es obtenida a partir de ensayos en la mar.

Un problema que presentan estos métodos es que cuando existe ruido en la medición se producen resultados incorrectos en la estimación de los parámetros, de ahí el interés de realizar análisis de regresión lineal y aplicar el método “stepwise” (Klein & Morelli, 2006) en la selección de la estructura del modelo ya que utiliza métricas estadísticas basadas en ensayos de hipótesis anidados para seleccionar la estructura del modelo de maniobrabilidad. Como modelo inicial se puede utilizar el propuesto por (Fossen, 2002). Otro aspecto a destacar son los autopilotos convencionales basados en modelos lineales que parten de la suposición de que las ecuaciones del movimiento pueden ser descritas por ecuaciones linealizadas en torno al punto de equilibrio. También se puede abordar el problema del diseño de autopilotos adaptativos basados en el control en modo deslizante, la linealización por realimentación de estados, la teoría del “backstepping” o la exploración de la estrategia “minimum variance control”.

El autopiloto debe realizar un seguimiento de trayectorias basándose en el seguimiento de “way points” y utilizar la estrategia de guiado “Line of Sight” o desarrollar controladores no lineales multi-variables para la posición y así realizar un seguimiento de una trayectoria prefijada como entrada al sistema, empleando en el diseño los modelos de maniobra no lineales identificados. Por otro lado, es necesario conocer en todo momento la posición y orientación del vehículo, por lo que la navegación y captura de datos nuevos sensores sonar se efectúa con los “doppler sonar”, los girocompases ópticos o unidades de medida inercial. Así, la profundidad, “heading”, “pitch” y “roll” se obtienen mediante sensores inerciales en configuración “strapdown” con medida directa del estado (posición y velocidad). Para el plano horizontal XY se emplean sensores de apoyo como son los transpondedores acústicos o los “doppler sonar” que aportan la posición XYZ con altas frecuencias de refresco.

Este estudio se ha basado en un vehículo con forma de torpedo, con el que han trabajado de forma conjunta la Universidad de Cantabria (UC) y el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (CEHIPAR) para determinar los parámetros de comportamiento que lo identifiquen.

El vehículo



Figura 1. Fotografía del C-Inspector.

El vehículo tiene una eslora de 1,65 m y un radio de 0,17 m. Su peso es de 35 kg y una velocidad máxima de 6 nudos. La forma de proa es una semiesfera y en popa tiene un cono con cuatro superficies planas de estabilización. Dispone de dos propulsores longitudinales cuyos ejes están separados del eje del cilindro 0.36 m. En la zona central dispone de un propulsor vertical y un orificio de compensación de presiones también vertical. El vehículo es autónomo y el sistema de generación de energía se basa en baterías tipo “Li-poly” (*lithium polymer batteries*) que le proporciona una autonomía aproximada de una hora para una velocidad de 3 nudos o 2 horas a 2 nudos. El propulsor vertical le proporciona una velocidad de 4,2 nudos. Su casco le permite operar hasta 300 m de profundidad, siendo la distancia máxima de operación de 1 Km. En su parte frontal monta una cámara de vídeo y dos luces halógenas. Además, dispone de un sonar de navegación situado en la proa y de un sonar de barrido lateral. El sistema propulsivo está compuesto por hélices accionadas por motores eléctricos. Dos hélices están situadas a ambos lados en el centro para avance y guiñada. Una tercera hélice perpendicular a las otras da la propulsión vertical del control de profundidad. La cabezada se consigue desplazando masas situadas en el interior de vehículo.

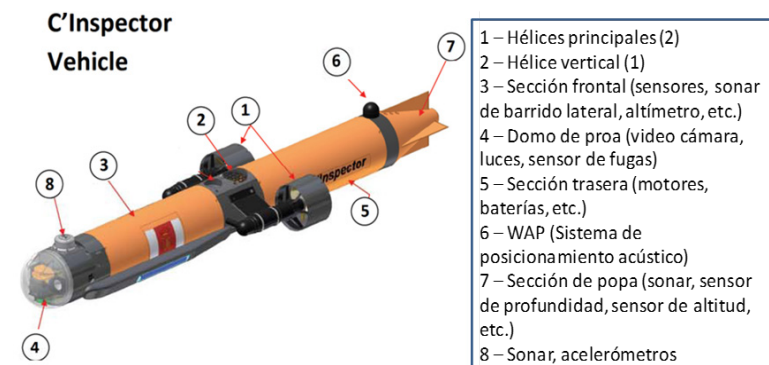


Figura 2. Configuración del vehículo.

A continuación se muestra un resumen de los parámetros que definen el movimiento del vehículo y que se tratan de modelizar y los sensores que incorpora para su caracterización.

Tabla 1.
Parámetros y sensores

Símbolo	Medida	Sensor
Ψ, θ, Φ	Rumbo, Cabezada, Balance	Acelerómetros
z	Profundidad	Sensor de presión
N_{Br} y E_r	RPM hélices babor y estribor	Tacómetros
Prop. Vert.	Propulsión vertical	Tacómetro
Pos. M	Posición de la masa	Potenciómetro

Particularmente, el sonar de barrido lateral monohaz tiene como principales características la frecuencia de trabajo de 675 kHz, un ancho de haz horizontal (-3 dB) de 0.5° y de haz vertical (-3 dB) de 30°. La comunicación con el vehículo se realiza a través de un cable de fibra óptica, que lleva los datos de forma bidireccional, de esta forma, se da al operador la capacidad de controlar de forma remota el vehículo a través del “human machine interface”. Para obtener la posición del vehículo, se dispone de un sistema “wideband acoustic positioning” que incluye un GPS y una antena con tres hidrófonos.

Pruebas de Mar

Las pruebas de mar propuestas por la International Towing Tank Conference (ITTC, 1975) y que se resumen en el artículo (López et al, 2004) comprenden entre otras las siguientes:

Curva de evolución: para calcular el radio de curvatura del vehículo y el comportamiento de la propulsión ante maniobras.

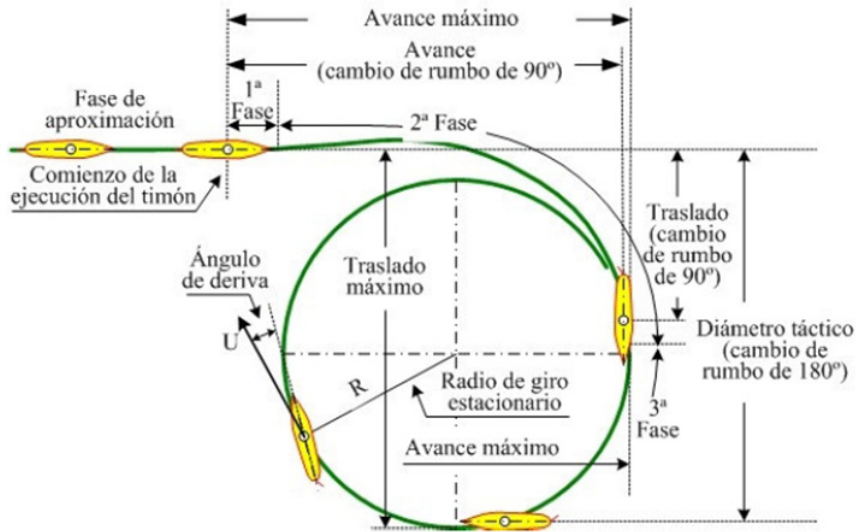


Figura 3. Curva de evolución.

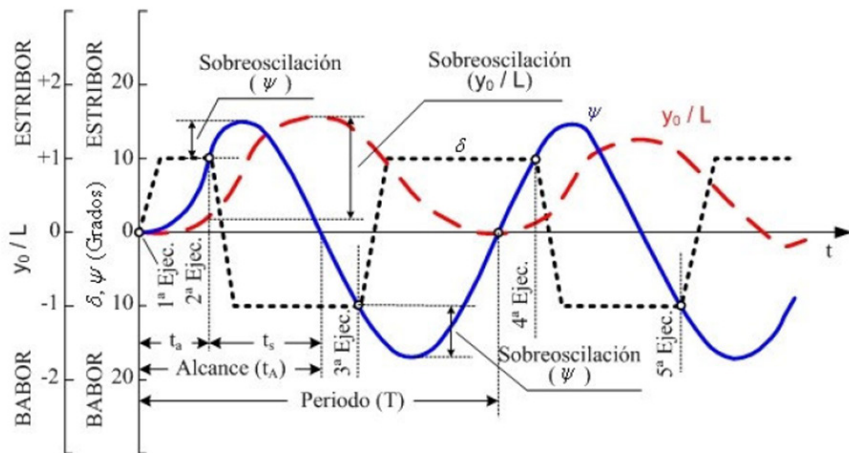


Figura 4. Maniobra de zig-zag.

Modelo Matemático

Debido a que el UUV se mueve en seis grados de libertad, para describir su movimiento son necesarias tres coordenadas que definan la traslación y otras tres para la orientación. Así, para estudiar el movimiento se utilizan dos sistemas de coordenadas, uno fijo en el propio vehículo para definir sus movimientos de traslación y rotación, y otro inercial de referencia para describir su posición y orientación. La ecuación no lineal del movimiento se puede expresar en forma vectorial (Fossen, 2002):

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$y = \eta + v \quad (2)$$

$$\dot{\eta} = R(\eta)v \quad (3)$$

$$\tau = [\tau_1, \tau_2]^T \quad (4)$$

En la que $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ es el vector de la posición con respecto al sistema de coordenadas fijado en tierra, $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ es el vector de las velocidades lineales y angulares, τ es el vector de las fuerzas y momentos (de control), donde $\tau_1 = [X, Y, Z]^T$ es el vector generalizado de las fuerzas externas con relación al eje de coordenadas fijado al vehículo y $\tau_2 = [K, M, N]^T$ el vector de los momentos de las fuerzas externas que actúan en el vehículo, v representa el ruido de medición y w las perturbaciones ambientales. M es la matriz de masas e inercias añadidas, $C(v)v$ la matriz de las fuerzas de coriolis, $g(\eta)$ la matriz de las fuerzas de restauración y $R(\eta)$ la matriz de rotación. Las fuerzas y momentos de amortiguamiento hidrodinámico se suponen que son una combinación del amortiguamiento lineal y no lineal de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$D(v)v = D_l v + D_{nl}(v)v \quad (5)$$

Para controlar el UUV se emplean tres propulsores, dos horizontales en su centro para controlar la velocidad y el ángulo de giro, es decir, fuerzas de avance y momentos de guiñada y un tercero vertical que controla su profundidad. El cabeceo se consigue moviendo unas masas. De esta forma el empuje se expresa como:

$$T = \rho D_h^4 K_T (J_0) n_r |n_r| (1 - t) \quad (6)$$

En la que ρ representa la densidad del agua, D_h el diámetro del propulsor, n las revoluciones, t es el factor de reducción del empuje con valores de 0.05 a 0.2 y K_T es el coeficiente adimensional del empuje:

$$K_T = \alpha_1 J_0 + \alpha_2 \quad (7)$$

Donde J_0 representa el radio de avance que está dado por:

$$J_0 = u_a / n_r D \quad (8)$$

Siendo u_a la relación entre la velocidad del agua y la del vehículo en régimen permanente:

$$u_a = (1 - w)u \quad (9)$$

Donde w cuenta con unos valores entre 0.1 y 0.4. Al sustituir el valor de J_0 y KT :

$$T = \rho D_h^4 |n_r| \left(\alpha_1 u_a / n_r D + n_r \alpha_2 \right) (1 - t) \quad (10)$$

Así, las ecuaciones de la fuerza de empuje avante y momento de guiñada se expresan por la ecuación:

$$\begin{bmatrix} \tau_{X,th} \\ \tau_{N,th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ d_p & -d_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_p \\ T_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde $\tau(X,th)$ representa la fuerza de control de avance, $\tau(N,th)$ el momento de guiñada, d_p la distancia del propulsor al centro del vehículo, T_p el empuje del propulsor de estribor y T_s el de babor. Además, si el ángulo de balance $\Phi \neq 0$, se produce un momento de cabeceo:

$$\tau_{M,th} = -(T_p - T_s) d_p \sin(\phi) \quad (12)$$

El control del cabeceo se consigue mediante el movimiento de unas masas situadas en el interior de vehículo en la mitad de proa. El desplazamiento de dichas masas provoca un momento de cabezada:

$$\tau_{M,mL} = g(c_G(d_{mL}(t))) \quad (13)$$

Donde, d_{mL} es la distancia desde el valor inicial del centro de gravedad x_G de avance a la masa y mL la masa del actuador. Con ello, las fuerzas de control τ generadas por los propulsores y el actuador de cabezada:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ 0 \\ \tau_z \\ 0 \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} \quad (14)$$

Estimación de los Parámetros Dinámicos

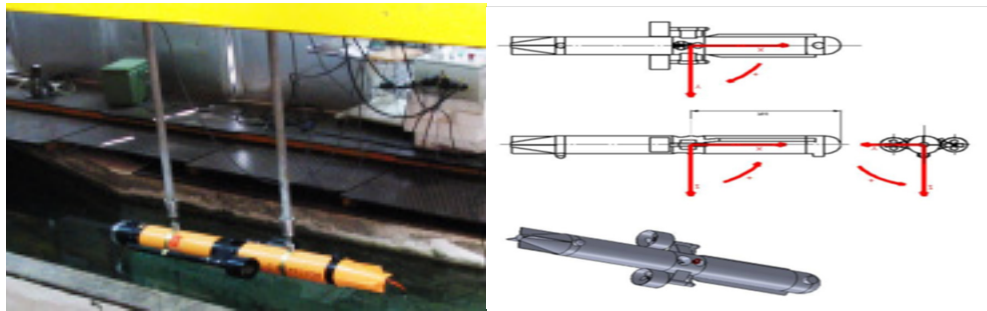


Figura 5. Esquema del montaje y sistema de coordenadas.

Este montaje dispone de una mesa de medida, sobre la cual van montados 2 cilindros que sujetan al vehículo, actuados por motores eléctricos. La mesa de medida está instalada en un carro remolcador que se desplaza a lo largo del canal de aguas tranquilas. La matriz realizada consistió en ensayos de remolque a distintas velocidades, deriva, pitch estático, roll dinámico, pitch dinámico, yaw dinámico, aceleración, frenada, sway dinámico y heave dinámico. Cada ensayo se ha realizado con 2 ó 3 amplitudes, así como ensayos adicionales para caracterizar los propulsores. Además, se han realizado las pruebas necesarias para determinar los momentos de inercia, el centro de gravedad y el centro de flotación del vehículo.

Como ejemplo de los algoritmos obtenidos, el ensayo de resistencia y aceleración longitudinal consistió en arrastrar el UUV en posición adrizada a velocidades entre 0.5 y 2.0 m/s, midiendo además la masa añadida durante las fases de aceleración y frenada. Se ha supuesto el siguiente modelo para la fuerza X :

$$X = X_0 + X_u u + X_{uu} u^2 + (-m + X_{\dot{u}}) \dot{u} \quad (15)$$

Dónde X_0 es la resistencia a la velocidad nominal u_0 (1.5 m/s) y $u = U - U_0$ siendo U la velocidad real en cada instante. Los parámetros se ajustaron a los resultados por mínimos cuadrados, obteniéndose los valores:

$$X_0 = -39.575 \text{ N} \quad \wedge \quad X_u = -54.564 \text{ Kg / s} \quad \wedge \quad X_{uu} = -18.787 \text{ Kg / m} \quad \wedge \quad X_{\dot{u}} = -30.673 \text{ Kg}$$

Conclusiones

En este trabajo se ha realizado una caracterización del modelado de vehículos submarinos no tripulados a través de un programa de ensayos ambicioso que ha hecho posible estimar los coeficientes hidrodinámicos de un modelo de maniobra no lineal de 6 grados de libertad de un UUV. Los algoritmos obtenidos y desarrollos diseñados se podrán incorporar a los equipos disponibles (UUVs) para llevar a cabo pruebas y experiencias tanto en entornos controlados como en salidas al entorno marino.

El futuro próximo nos conduce al aumento en el empleo de estas tecnologías, mediante el aumento de la automatización de las plataformas navales, hasta hacerlas no tripuladas; la mejora de sensores y procesadores, para incrementar las capacidades ISTAR y el aumento de la autonomía y precisión de los sistemas.

Referencias

- 14th ITTC. (1975) Discussions and Recommendations for an ITTC 1975 Maneuvering Trial Code. *14th International Towing Tank conference*, Ottawa, September 1975, p 348-365.
- Fossen, T. I. (2002). *Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics AS, Trondheim, Norway.
- Klein, V. and Morelli, E. A. (2006). *Aircraft system identification: Theory and practice*. OR: Book News, Inc. Portland.
- López, E., Velasco, F., Moyano, E. and Rueda, T. (2004). *Full Scale Manoeuvring Trials Simulation*. Journal of Maritime Research, Vol. I. No. 3, pp. 37-50.
- Riola, J. (2011). *La política de I+D en Defensa: Metas y retos tecnológicos. Las ecnologías de Doble Uso: La Investigación y el Desarrollo al Servicio de la Sociedad Civil y Militar*. Curso de Verano y I Jornadas. Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, 13-22, Murcia.
- Riola, J. y Díaz, J. (2009). Aplicación de los USV al rastreo de minas.- Proyecto SIRAMICOR.



Participación de los Cadetes en actividades náuticas como parte de la formación integral.



Formación del Batallón de Cadetes para ceremonia.
