

Modelo cinemático para el control del vehículo BlueRov2 Heavy en Modo Estabilizar

Cerrada, C.^{a,*}, Chaos, D.^a, Moreno-Salinas, D.^a, Aranda, J.^a

^aDepartamento de Informática y Automática, UNED, C/ Juan del Rosal 16, 28040 Madrid, España.

Resumen

En este artículo se presenta un modelo cinemático sencillo enfocado al control del vehículo BlueRov2 Heavy. Éste es un vehículo comercial, remotamente operado, de código abierto, muy utilizado en los últimos años, al que se pueden añadir distintos sensores y accesorios. Se pretende además aprovechar las características de su modo de funcionamiento “Modo Estabilizar”. El modelo se centra en determinar la relación entre las entradas de control y las velocidades que éstas producen en el vehículo. Las medidas de las velocidades se obtienen a partir de los sensores del vehículo, en concreto se utiliza la IMU (*Inertial Measurement Unit*) para la velocidad angular y el DVL (*Doppler Velocity Logger*) para la velocidad lineal. La identificación de los parámetros del modelo se realiza utilizando la técnica de mínimos cuadrados. El propósito de este modelo es permitir un control cinemático autónomo de alto nivel que envíe comandos de velocidad que el vehículo pueda seguir.

Palabras clave: Modelado, Identificación y Tratamiento de Señales, Diseño de Control, Sistemas de Control No Lineales, Sistemas Marinos.

Kinematic model for the control of the BlueRov2 Heavy vehicle in Stabilize Mode

Abstract

This article presents a simple kinematic model focused on the control of the BlueRov2 Heavy vehicle. This is an open source remotely operated commercial vehicle that has been widely used in recent years, to which various sensors and accessories can be added. It is also intended to take advantage of the characteristics of its “Stabilise Mode”. The model focuses on determining the relationship between control inputs and the velocities they produce in the vehicle. The velocity measurements are obtained from vehicle sensors, specifically the IMU (*Inertial Measurement Unit*) for angular velocity and the DVL (*Doppler Velocity Logger*) for linear velocity. The model parameters are identified using the least squares technique. The purpose of this model is to allow high-level autonomous kinematic control that sends velocity commands that the vehicle can follow.

Keywords: Modelling, Identification and Signal Processing, Control Design, Non-Linear Control Systems, Marine Systems.

1. Introducción

El modelado y la identificación de los sistemas es un tema de gran interés en el ámbito de la ingeniería y la investigación, especialmente útil a la hora de simular, diseñar o controlar un sistema. Los modelos matemáticos describen la relación entre las variables y componentes de un sistema mediante ecuaciones. Pueden existir diversos modelos de un sistema dependiendo del propósito para el que se vaya a utilizar. Para los vehículos submarinos no tripulados se suele utilizar el modelo presentado en (Fossen, 2011), que de forma general se divide en una serie de ecuaciones cinemáticas, encargadas de describir los aspectos geométricos del movimiento del vehículo, y unas ecuaciones

dinámicas, que analizan las fuerzas y momentos del agua y de la propulsión del vehículo, involucradas en el movimiento. Si se quiere emplear el modelo en simulación, se necesita que éste describa de forma precisa el sistema, por lo que la complejidad y número de ecuaciones será grande, mientras que para diseñar un control se puede utilizar un modelo más simple.

Las técnicas de identificación que se pueden emplear abarcan un amplio abanico de opciones, siendo algunas de uso habitual como la técnica de mínimos cuadrados (LS, *Least-Squares*) (Ridao et al., 2004) y las técnicas de *machine learning*, dentro de las que se encuentran las redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) y la regresión no paramétrica, como la técnica de *Support Vector Machines* (SVM), (Ma-

*Autor para correspondencia: criscerrada@dia.uned.es

catangay et al., 2024). Cabe destacar los trabajos realizados en (Moreno-Salinas et al., 2013), donde se combina la técnica de mínimos cuadrados y la de SVM para determinar los parámetros del modelo de una embarcación marítima de superficie; y en (Castillo-Zamora et al., 2021), donde se utiliza la técnica de mínimos cuadrados junto con la simulación de dinámica de fluidos computarizada (CFD, *Computed Fluid Dynamics*) para estimar los parámetros hidrodinámicos de un mini-AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*).

En concreto, para este trabajo se va a utilizar el vehículo de código abierto BlueRov2 Heavy de la compañía BlueRobotics (Robotics, 2016). Este vehículo es un ROV (*Remotely Operated Vehicle*), es decir, un vehículo submarino no tripulado controlado a distancia por un operador, generalmente mediante un *joystick* o *gamepad*, a través de un cordón umbilical (*theter*). En los últimos años, se han desarrollado diversos trabajos de investigación con este vehículo, desde diseño de controles para seguimiento de trayectorias (González-García et al., 2021) o para posicionamiento (Yang and Xing, 2021) hasta aplicaciones de limpieza de instalaciones marinas (von Benzon et al., 2021) o de simulación (Ortiz-Toro et al., 2024).

También, se han realizado trabajos centrados en el modelado y la identificación del vehículo. En todos los casos se parte del modelo de ecuaciones cinemáticas y dinámicas de (Fossen, 2011), pero se utilizan distintas técnicas para identificar los parámetros hidrodinámicos, por ejemplo, mediante el filtro de Kalman extendido (Aili and Ekelund, 2016), mínimos cuadrados (Wu, 2018) o el motor físico del entorno de simulación Gazebo (Tun et al., 2023). Estos modelos son bastante complejos, complejos y útiles tanto para simulación como para diseño de controles. Sin embargo, su mayor inconveniente es que si varía la geometría del vehículo, como le sucede al BlueRov2 utilizado en este trabajo (al que se le han añadido una serie de sensores y accesorios adicionales), es necesario identificar de nuevo los parámetros hidrodinámicos, lo cual requiere realizar una serie de ensayos complejos y costosos en tiempo y recursos (Avila et al., 2013). Además, estos modelos consideran el control individual de los motores, pero el vehículo está diseñado para recibir entradas de control tipo *joystick* en las direcciones de movimiento del vehículo y realizar de forma automática el reparto de fuerza en los motores.

En base a todas estas ideas, el presente trabajo propone un modelo más sencillo que relacione las entradas de control con las velocidades que producen en el vehículo. Dado que tanto las entradas de control como las velocidades son fáciles de obtener a partir de los sensores del vehículo, el diseño de los experimentos es sencillo. También, se busca que el modelo aproveche las características del modo de funcionamiento “Modo Estabilizar” y de las entradas de control tipo *joystick*. En vista de los buenos resultados mostrados en otros trabajos, se utiliza la técnica de mínimos cuadrados para la identificación de los parámetros del modelo. Este modelo se hace con el propósito de diseñar posteriormente controles para que el vehículo realice diversas tareas, eliminando el control a través de un operador con el *joystick* y permitiendo un control cinemático autónomo de alto nivel que envíe comandos de velocidad que el vehículo pueda seguir.

Por tanto, las contribuciones principales de este trabajo son:

- La implementación de un modelo cinemático que relaciona las entradas de control con las velocidades alcanzadas

por el vehículo.

- La identificación de los parámetros del modelo de forma simple mediante la técnica de mínimos cuadrados.
- El cálculo de la relación inversa de las variables del modelo para enviar consignas de velocidad al vehículo. Estas consignas pueden ser usadas para crear un control cinemático autónomo de alto nivel que permita el seguimiento de velocidad.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta la formulación del problema. Los resultados se muestran en la Sección 3 y finalmente, las conclusiones y trabajos futuros se detallan en la Sección 4.

2. Formulación del problema

El vehículo BlueRov2 Heavy utilizado cuenta con 8 motores, 4 horizontales y 4 verticales, dispuestos de tal manera que permiten el control del vehículo en 6 grados de libertad: el ángulo de balanceo (*roll*), la traslación en el eje *x* (*surge*), el ángulo de cabeceo (*pitch*), la traslación en el eje *y* (*sway*), el ángulo de guiñada (*yaw*), y la traslación en el eje *z* (*heave*) (ver Figura 1). Es decir, el vehículo es sobreactuado.

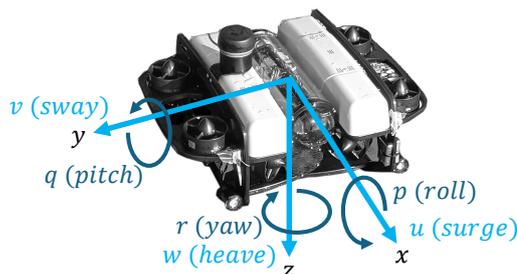


Figura 1: Movimientos de traslación y rotación con la nomenclatura SNAME (SNAME, 1950).

La configuración básica consta de una cámara HD; luces; un controlador de vuelo (Pixhawk PX4 autopilot) con sensores, como una unidad de medida inercial (*Inertial Measurement Unit*, IMU), que proporciona la medida de velocidad angular; un ordenador Raspberry 3 modelo B; y un cordón umbilical que permite la comunicación y el control del vehículo desde un ordenador en la superficie. Adicionalmente, como ayuda a la navegación se han añadido una serie de sensores, entre los que destaca el DVL (*Doppler Velocity Logger*, Figura 2), que proporciona la medida de velocidad lineal con respecto al fondo. La configuración final del vehículo se muestra en la Figura 3.



Figura 2: Sensor DVL.



Figura 3: Configuración del vehículo BlueRov2 Heavy tras añadir distintos accesorios y sensores.

El vehículo tiene distintos modos de funcionamiento y para este trabajo se va a utilizar el Modo Estabilizar. Este modo estabiliza de forma automática *roll* y *pitch* y mantiene *yaw* mientras no se envíe un comando para girar el vehículo, lo que permite un manejo sencillo en los movimientos de traslación *surge*, *sway* y *heave*. Este modelo se centra en el plano XY, es decir, se van a determinar los modelos para las velocidades lineales *surge* (u) y *sway* (v) y para la velocidad angular *yaw rate* (r).

El control del vehículo se realiza desde un ordenador, simulando los comandos de un *joystick* en cada grado de libertad, y el control de cada motor se reparte de forma interna a partir del comando recibido. Las entradas de control enviadas consisten en señales PWM (*Pulse Width Modulation*) entre 1100 y 1900 microsegundos, que se corresponden con total propulsión hacia atrás y hacia adelante, respectivamente, el valor central de 1500 μs corresponde al vehículo parado. Por sencillez, se han definidos las entradas de control normalizadas a_u (para *surge*), a_v (para *sway*) y a_r (para *yaw rate*). El valor de las entradas normalizadas se ha definido entre -1 y 1 según (1), siendo -1 la máxima propulsión hacia atrás, 1 la máxima propulsión hacia adelante y 0 estar parado. Un ejemplo de entrada de control es el experimento que se muestra en la Figura 4, en la que la entrada normalizada a_u toma los valores $0,5$, 0 y $-0,5$.

$$\text{valor normalizado} = \frac{\text{valor } \mu s - 1500 \mu s}{400 \mu s} \quad (1)$$

Siguiendo con el ejemplo anterior, la Figura 5 muestra la medida proporcionada por el DVL de la velocidad *surge* alcanzada al aplicar la señal de entrada de la Figura 4. Al observar las medidas de la velocidad alcanzada por el vehículo tras enviar esta entrada normalizada, se aprecia claramente como la velocidad aumenta o disminuye casi instantáneamente al variar el valor de la entrada. Y de forma similar ocurre en el resto de experimentos en las restantes velocidades. Por esta razón, se decide realizar un modelo cinemático que relacione las entradas normalizadas a_u , a_v y a_r con sus correspondientes velocidades en estado estacionario u , v y r , utilizando el Modo Estabilizar como un controlador interno para garantizar la estabilización de *roll* y *pitch* y por tanto, el movimiento en el plano XY. Con esto se pretende permitir un control cinemático autónomo de alto nivel que envíe comandos de velocidad que el vehículo pueda seguir.

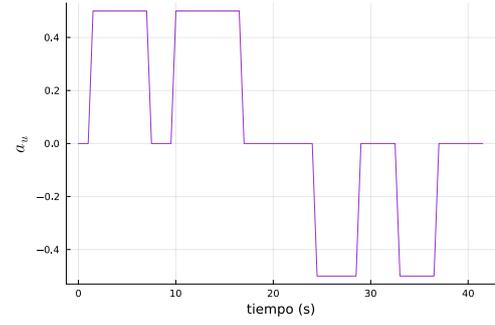


Figura 4: Señal de entrada normalizada para *surge* variando entre $a_u = 0,5$, $a_u = 0$ y $a_u = -0,5$.

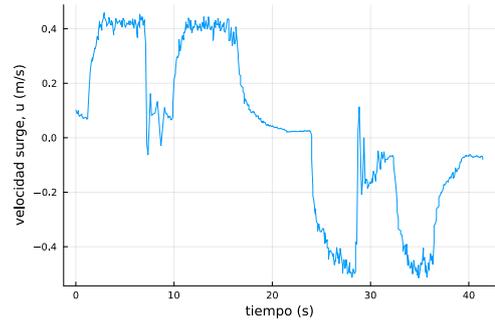


Figura 5: Velocidad *surge* (u) medida por DVL para señal de entrada normalizada variando entre $a_u = 0,5$, $a_u = 0$ y $a_u = -0,5$.

2.1. Ajuste del modelo

El modelo se basa en una función empírica f_i que relaciona la entrada normalizada a_i con su correspondiente velocidad V_i y que está parametrizada por el vector de parámetros θ_i , siendo $i = u, v, r$, es decir, $u = V_u = f_u(a_u, \theta_u)$, $v = V_v = f_v(a_v, \theta_v)$ y $r = V_r = f_r(a_r, \theta_r)$. Para la identificación de los parámetros del modelo propuesto se emplea mínimos cuadrados, y se define el siguiente problema de optimización (2).

$$\begin{aligned} \theta_i^* &= \arg \min_{\theta_i} J(\theta_i) \\ \text{su} \text{ jeto a :} & \\ J(\theta_i) &= \sum_{n=1}^N (V_{i_n} - f(a_{i_n}, \theta_i))^2, \end{aligned} \quad (2)$$

donde θ_i^* son los parámetros óptimos para el modelo i , $J(\theta_i)$ es la función de coste, N es el número de datos, V_{i_n} es la medida de velocidad i de cada dato, y a_{i_n} es la entrada de control i aplicada para cada dato.

3. Resultados

Se realizan una serie de experimentos en los que se mide la velocidad que alcanza el vehículo para distintas entradas normalizadas en *surge* (a_u), *sway* (a_v) y *yaw rate* (a_r) para cada experimento. Unos experimentos se utilizan para la estimación del modelo y otros se reservan para la validación del mismo. Para la estimación del modelo, se calcula el valor medio y la desviación típica de la velocidad estacionaria alcanzada para

cada una de las entradas normalizadas, que se aplican de forma independiente con el fin de que no haya acoplamientos. La Figura 6 muestra un ejemplo de la velocidad estacionaria con la que se realizan los cálculos para la entrada de la Figura 4. Para determinar cuándo se alcanza el estado estacionario se usa un valor de corte, definido como el valor que se obtiene cuando tras el estacionario se establece la entrada de control a cero, tal como se ve en la Figura 6.

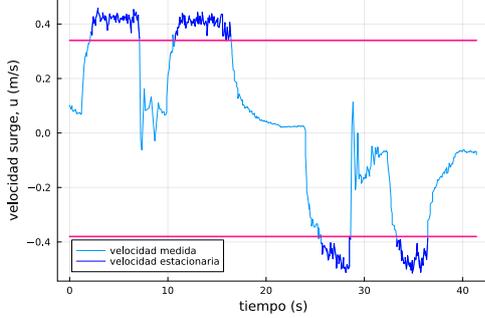


Figura 6: Velocidad *surge* (u) medida por DVL para la señal de entrada normalizada variando entre $a_u = 0,5$, $a_u = 0$ y $a_u = -0,5$, destacando en azul oscuro la velocidad estacionaria alcanzada y en rosa los valores de corte 0,34 y $-0,38$.

3.1. Surge

Al representar los datos de velocidad media obtenidos para cada entrada normalizada en *surge*, se observa una relación de saturación entre las entradas y las velocidades. La Figura 7 muestra los datos de velocidad *surge* media con su respectiva desviación estándar para la entrada normalizada a_u variando entre los valores -1 y 1 con incrementos de $0,25$, y el resultado del ajuste por mínimos cuadrados. En vista de esta relación de saturación, se define la función $f_u(a_u, \theta_u)$ como (3).

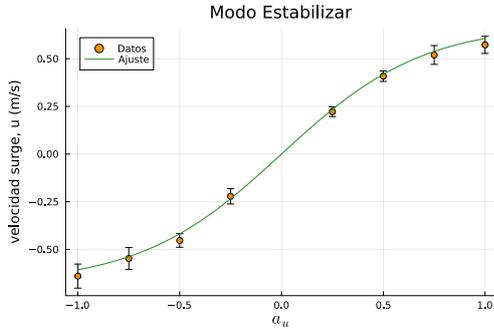


Figura 7: Datos de velocidades medias y desviaciones estándar para diferentes valores de a_u variando entre -1 y 1 junto con el ajuste en *surge*.

$$u_{es} = f_u(a_u, \theta_u) = \theta_1 \cdot \tanh(\theta_2 \cdot a_u), \quad (3)$$

siendo u_{es} la velocidad *surge* estimada, y $\theta_u = [\theta_1, \theta_2]$ los parámetros a optimizar para obtener el ajuste por mínimos cuadrados.

En este caso, se obtiene el siguiente ajuste por mínimos cuadrados (4).

$$u_{es} = 0,68 \cdot \tanh(1,44 \cdot a_u). \quad (4)$$

En la Figura 8 puede verse una comparación entre la velocidad u medida por el DVL y la velocidad estimada u_{es} con (4)

al aplicar la señal de entrada de la Figura 4 para los datos utilizados en la estimación del modelo y para los datos reservados para la validación. Además, se observa que el ajuste realizado es suficientemente bueno, dado que la velocidad medida es cercana a la estimada y ajusta los valores medios dentro del margen de error de la desviación estándar.

Por tanto, la forma inversa de (4) se puede usar para el diseño de acciones de control para una tarea determinada, es decir, para calcular la entrada de control a_u necesaria para alcanzar una velocidad *surge* deseada u_{des} (5). Este resultado permite un control cinemático de alto nivel del vehículo, sabiendo que el Modo Estabilizar estabiliza internamente el vehículo y le permite ser capaz de seguir una referencia de velocidad.

$$a_u = \frac{\tanh^{-1}(u_{des}/0,68)}{1,44}. \quad (5)$$

3.2. Sway

De forma similar al caso anterior, para la velocidad *sway* también aparece una relación de saturación entre las entradas y las velocidades. Por tanto, se puede definir la función $f_v(a_v, \theta_v)$ de manera equivalente a (3) y se obtiene el siguiente ajuste por mínimos cuadrados (6), donde v_{es} representa la velocidad *sway* estimada.

$$v_{es} = 0,37 \cdot \tanh(1,86 \cdot a_v). \quad (6)$$

La Figura 9 muestra los datos de la velocidad *sway* media y su desviación estándar para la entrada normalizada a_v , variando entre los mismos valores que a_u , junto al resultado del ajuste por mínimos cuadrados.

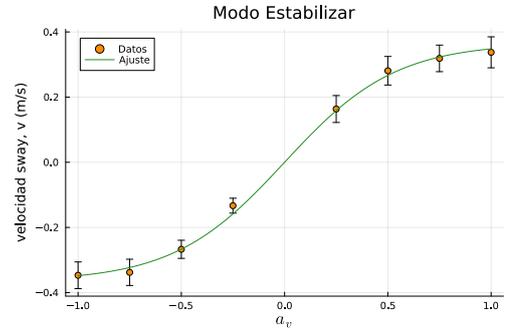


Figura 9: Datos de velocidades medias y desviaciones estándar para diferentes valores de a_v variando entre -1 y 1 junto con el ajuste en *sway*.

La comparación entre la velocidad v medida por el DVL y la velocidad estimada v_{es} con (6) para una señal de entrada normalizada variando entre $a_v = 0,5$, $a_v = 0$ y $a_v = -0,5$, para los datos utilizados en la estimación del modelo y para los datos reservados para la validación, puede verse en la Figura 10. A pesar de que la velocidad medida presenta algunos outliers, se observa que el ajuste realizado también es suficientemente bueno, la velocidad medida es cercana a la estimada y los valores medios se ajustan dentro del margen de error de la desviación estándar.

La entrada de control a_v necesaria para alcanzar una velocidad *sway* deseada v_{des} queda definida con (7).

$$a_v = \frac{\tanh^{-1}(v_{des}/0,37)}{1,86}. \quad (7)$$

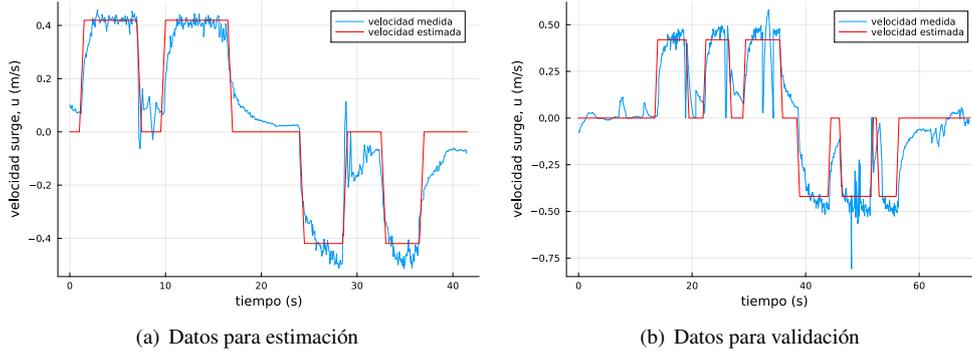


Figura 8: Comparación de la velocidad *surge* medida por el DVL (u , en azul) y la velocidad *surge* estimada (u_{es} , en rojo) calculada con (4) para la señal de entrada normalizada variando entre $a_u = 0,5$, $a_u = 0$ y $a_u = -0,5$ en Modo Estabilizar.

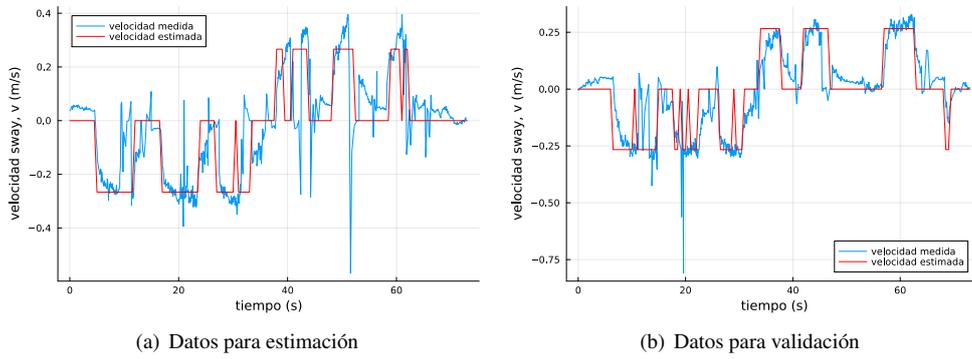


Figura 10: Comparación de la velocidad *sway* medida por el DVL (v , en azul) y la velocidad *sway* estimada (v_{es} , en rojo) calculada con (6) para una señal de entrada normalizada variando entre $a_v = 0,5$, $a_v = 0$ y $a_v = -0,5$ en Modo Estabilizar.

3.3. Yaw rate

Finalmente, se presentan los resultados para la velocidad *yaw rate*, que son similares a los de las velocidades *surge* y *sway*. En este caso, el ajuste por mínimos cuadrados es (8), siendo r_{es} la velocidad *yaw rate* estimada.

$$r_{es} = 1,94 \cdot \tanh(1,45 \cdot a_r). \quad (8)$$

Una vez más, la Figura 11 muestra los datos de la velocidad *yaw rate* media con su desviación estándar para la entrada normalizada a_r variando entre los mismos valores que a_u , y el resultado del ajuste por mínimos cuadrados.

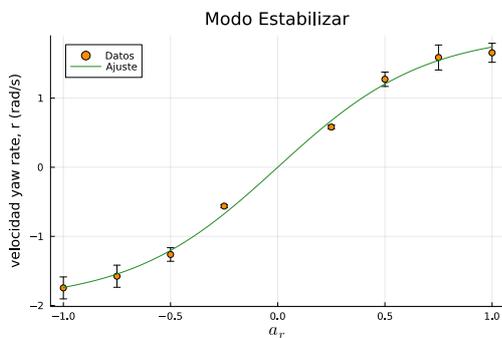


Figura 11: Datos de velocidades medias y desviaciones estándar para diferentes valores de a_r variando entre -1 y 1 junto con el ajuste en *yaw rate*.

En la Figura 12 se ve la comparación entre la velocidad

r medida por la IMU y la velocidad estimada r_{es} con (8) para una señal de entrada normalizada variando entre $a_r = 0,5$, $a_r = 0$ y $a_r = -0,5$, para los datos utilizados en la estimación del modelo y para los datos reservados para la validación. En este caso, la velocidad medida también es cercana a la estimada dentro del margen de error (a excepción de los valores más bajos $a_r = \pm 0,25$), por lo que se puede concluir que el ajuste realizado es suficientemente bueno.

Por último, la entrada de control a_r en función de la velocidad *yaw rate* deseada r_{des} se calcula como (9).

$$a_r = \frac{\tanh^{-1}(r_{des}/1,94)}{1,45}. \quad (9)$$

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este artículo se ha presentado un modelo cinemático para el control del vehículo BlueRov2 Heavy funcionando en Modo Estabilizar. El modelo se ha realizado para los movimientos del vehículo en el plano XY y relaciona las entradas de control con las respectivas velocidades alcanzadas en *surge*, *sway* y *yaw rate*. El valor de las entradas de control se ha normalizado y para la identificación de los parámetros del modelo se ha utilizado la técnica de mínimos cuadrados. Los resultados han mostrado que las velocidades tienden hacia la saturación a medida que aumentan las entradas y por tanto, se pueden modelar por medio de una tangente hiperbólica. El ajuste de los parámetros del modelo ha sido suficientemente bueno para que la velocidad medi-

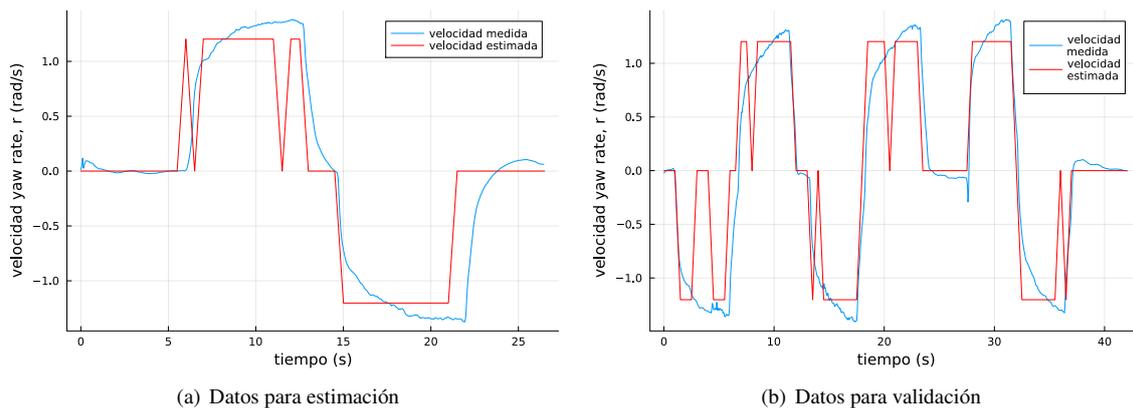


Figura 12: Comparación de la velocidad *yaw rate* medida por la IMU (r , en azul) y la velocidad *yaw rate* estimada (r_{es} , en rojo) calculada con (8) para una señal de entrada normalizada variando entre $a_r = 0,5$, $a_r = 0$ y $a_r = -0,5$ en Modo Estabilizar.

da se acerque a la velocidad estimada. Estos resultados también han mostrado que el vehículo es capaz de seguir una referencia de velocidad, por lo que se pueden emplear en el desarrollo de un control cinemático de alto nivel.

Por tanto, una línea interesante de trabajo futuro sería el desarrollo de un control cinemático de alto nivel para que el vehículo realizara una tarea de forma autónoma, empleando el modelo presentado en este trabajo para enviar los comandos de velocidad deseada.

También sería interesante extender el modelado e identificación para el movimiento a lo largo de otros ejes. Así como realizar el modelado e identificación para otros modos de funcionamiento del vehículo, tales como el “Depth Hold Mode”, el “Position Hold Mode” o el “Auto Mode”.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias a la financiación recibida del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto con referencia PID2023-146540OB-C41 (NEMO4EXOAMIC). El trabajo del primer autor está financiado por el proyecto con referencia PID2022-139187OB-I00 (COLLECTIVELY).

Referencias

Aili, A., Ekelund, E., 2016. Model-Based Design, Development and Control of an Underwater Vehicle. Master’s thesis, Linköping University, Automatic Control.

Avila, J. P. J., Donha, D. C., Adamowski, J. C., 2013. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles. *Ocean Engineering* 60, 81–94. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.007

Castillo-Zamora, J. J., Camarillo-Gómez, K. A., Pérez-Soto, G. I., Rodríguez-Reséndiz, J., Morales-Hernández, L. A., 2021. Mini-AUV Hydrodynamic Parameters Identification via CFD Simulations and Their Application on Control Performance Evaluation. *Sensors* 21, 1–25. DOI: 10.3390/s21030820

Fossen, T. I., 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom. DOI: 10.1002/9781119994138

González-García, J., Narcizo-Nuci, N. A., García-Valdovinos, L. G., Salgado-Jiménez, T., Gómez-Espinosa, A., Cuan-Urquiza, E., Cabello, J. A. E., 2021. Model-Free High Order Sliding Mode Control with Finite-Time Tracking for Unmanned Underwater Vehicles. *Applied Sciences* 11, 1–21. DOI: 10.3390/app11041836

Macatangay, X., Gabriel, S. A., Hoseinnezhad, R., Fowler, A., Bab-Hadiashar, A., 2024. Machine Learning for Modeling Underwater Vehicle Dynamics: Overview and Insights. *IEEE Access* 12, 139486–139504. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3464644

Moreno-Salinas, D., Chaos, D., de la Cruz, J. M., Aranda, J., 2013. Identification of a Surface Marine Vessel Using LS-SVM. *Journal of Applied Mathematics* 2013, 1–11. DOI: 10.1155/2013/803548

Ortiz-Toro, C. A., Cerrada-Collado, C., Moreno-Salinas, D., Chaos-García, D., García-Suárez, K. L., Otero, P., Vidal-Pérez, J. M., Luque-Nieto, M. A., Vázquez, A. I., Fraile-Ardanuy, J. J., Negro-Valdecantos, V., Jimenez-Yguacel, E., Aranda-Almansa, J., Zazo-Bello, S., Zufiria, P. J., Magdalena, L., Parras, J., Gutiérrez, A., 2024. NauSim: Un simulador de código abierto para el control, desarrollo y despliegue de drones submarinos. *XLV Jornadas de Automática*, 1–6. DOI: 10.17979/ja-cea.2024.45.10895

Ridao, P., Tiano, A., El-Fakdi, A., Carreras, M., Zirilli, A., 2004. On the identification of non-linear models of unmanned underwater vehicles. *Control Engineering Practice* 12, 1483–1499. DOI: 10.1016/j.conengprac.2004.01.004

Robotics, B., 2016. *Bluerov2: The world’s most affordable high-performance rov*. BlueROV2 datasheet.

SNAME, 1950. *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid*. Tech. rep., The Society of naval Architects and Marine Engineers, series: Technical and research bulletin N° 3-47.

Tun, T. T., Huang, L., Preece, M. A., 2023. Development and High-Fidelity Simulation of Trajectory Tracking Control Schemes of a UUV for Fish Net-Pen Visual Inspection in Offshore Aquaculture. *IEEE Access* 11, 135764–135787. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3337872

von Benzon, M., Sørensen, F., Liniger, J., Pedersen, S., Klemmensen, S., Schmidt, K., 2021. Integral Sliding Mode Control for a Marine Growth Removing ROV with Water Jet Disturbance. In: *2021 European Control Conference (ECC)*, pp. 2265–2270. DOI: 10.23919/ECC54610.2021.9655050

Wu, C.-J., 2018. 6-dof modelling and control of a remotely operated vehicle. Ph.D. thesis, Flinders University, College of Science and Engineering.

Yang, X., Xing, Y., 2021. Tuning for robust and optimal dynamic positioning control in BlueROV2. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1201, 1–18. DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012015