

Identificación no lineal de un modelo semifísico para el vehículo submarino BlueRov2 Heavy en 3 grados de libertad

Espinal, A.^{a,*}, Cerrada, C.^a, Chaos, D.^a, Moreno-Salinas, D.^a

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

Resumen

La identificación de sistemas es un paso crítico dentro de la ingeniería de control para la predicción del comportamiento dinámico de los sistemas y el desarrollo de controladores. Hay numerosas técnicas de identificación, tanto lineales como no lineales, basadas en los principios físicos del sistema o en datos experimentales. En este artículo, se utiliza un modelo no lineal semifísico simple de primer orden, cuya estructura combina dos submodelos: uno basado en principios físicos para modelar la resistencia al avance y el otro, un submodelo polinomial, para modelar el empuje a través de los actuadores. El objetivo de los modelos es predecir las velocidades en 3 grados de libertad (DOF) del vehículo submarino BlueRov2 Heavy, es decir, en *surge*, *sway* y *yaw*. El modelo cuenta con parámetros desconocidos, que fueron estimados con los datos obtenidos experimentalmente. Se han realizado distintos experimentos con el vehículo submarino en los que, manteniendo un lazo de control interno para estabilizar el vehículo a una determinada profundidad, se han enviado señales pulse width modulation (PWM) a los actuadores en lazo abierto para recopilar los datos de las velocidades lineales en *surge*, *sway* y la velocidad angular *yaw* para la estimación y validación de los modelos. Finalmente, se hace una comparación entre los modelos propuestos en este artículo y los modelos cinemáticos presentados en (Cerrada et al., 2025b), basada en el criterio de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el índice de mejora. Los resultados muestran que los modelos propuestos en este trabajo tienen un menor RMSE y un mayor índice de mejora, siendo más precisos y fiables para predecir las velocidades del vehículo submarino.

Palabras clave: identificación no lineal, modelo semifísico, vehículo submarino, BlueRov2 Heavy, 3 grados de libertad.

Nonlinear identification of a semi-physical model for the BlueRov2 Heavy underwater vehicle in 3 degrees of freedom

Abstract

System identification is a critical step in control engineering for predicting the dynamic behavior of systems and developing controllers. Numerous identification techniques, both linear and nonlinear, exist, based on the system's physical principles or on experimental data. This article uses a simple, first-order, semi-physical nonlinear model, whose structure combines two submodels: one based on physical principles to model drag and the other, a polynomial submodel, to model thrust through the actuators. The models aim to predict the velocities in the 3 degrees of freedom (DOF) of the BlueRov2 Heavy underwater vehicle: *surge*, *sway*, and *yaw*. The model includes unknown parameters, which were estimated using experimentally obtained data. Various experiments were conducted with the underwater vehicle. While maintaining an internal control loop to stabilize the vehicle at a specific depth, pulse-width modulation (PWM) signals were sent to the open-loop actuators to collect linear velocity data for *surge* and *sway*, as well as angular velocity *yaw*, for model estimation and validation. Finally, a comparison was made between the models proposed in this article and the kinematic models presented in (Cerrada et al., 2025b), based on the root mean square error (RMSE) criterion and the improvement performance. The results show that the models proposed in this work have a lower RMSE and a higher performance index, making them more accurate and reliable for predicting the underwater vehicle's velocities.

Keywords: nonlinear identification, semi-physical model, underwater vehicle, BlueRov2 Heavy, 3 degrees of freedom.

1. Introducción

El modelado y la identificación de sistemas constituyen un área de gran relevancia en la ingeniería y la investigación, especialmente cuando se requiere simular, diseñar o controlar un sistema (Ljung, 2010). Los modelos matemáticos permiten describir las relaciones entre las variables y los componentes que lo conforman mediante ecuaciones.

Un mismo sistema puede representarse mediante distintos modelos, dependiendo del propósito para el que se elabore. En el caso de los vehículos submarinos no tripulados, para un sistema de 3 grados de libertad, es habitual emplear el modelo propuesto en (Fossen, 2011). De manera general, este modelo se estructura en un conjunto de ecuaciones cinemáticas, que describen los aspectos geométricos del movimiento del vehículo, y un conjunto de ecuaciones dinámicas, que representan las fuerzas y momentos generados tanto por el entorno acuático como por la propulsión.

Cuando el objetivo es utilizar el modelo en simulación, es necesario que la descripción del sistema sea lo más precisa posible, lo que implica un aumento considerable en la complejidad y en el número de ecuaciones involucradas. Una alternativa para emplear modelos sencillos para predecir los movimientos del vehículo submarino sería la utilización de técnicas tradicionales como la identificación no lineal de un modelo semifísico o de caja gris, lo cual combina el modelado de caja blanca basado en el conocimiento físico del proceso y el modelado de caja negra que emplea datos empíricos para construir modelos paramétricos no lineales (Ljung, 1999).

Existe una gran variedad de técnicas de identificación, destacando algunas de uso extendido, como la técnica de mínimos cuadrados (LS, *Least-Squares*) (Ridao et al., 2004), así como diversas técnicas de *machine learning*. Dentro de estas últimas se incluyen las redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) y los métodos de regresión no paramétrica, entre ellos *Support Vector Machines* (SVM), (Macatangay et al., 2024). Resultan especialmente relevantes los trabajos presentados en (Moreno-Salinas et al., 2013), donde se combina el enfoque de mínimos cuadrados con SVM para estimar los parámetros del modelo de una embarcación marítima de superficie; y en (Castillo-Zamora et al., 2021), donde se emplea la técnica de mínimos cuadrados junto con simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD, *Computed Fluid Dynamics*) con el fin de determinar los parámetros hidrodinámicos de un mini-AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*).

Respecto a la estimación de parámetros de un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) basado en ensayos experimentales. Por ejemplo, hay trabajos como (Herrero et al., 2024b), donde se emplean técnicas de inferencia indirecta con datos de canal de ensayos, o (Herrero et al., 2024a), centrados en el diseño de experimentos para la identificación de parámetros.

Existen otras contribuciones relevantes en la literatura que abordan problemas similares desde distintas perspectivas experimentales, como la comparación entre ensayos en canal y pruebas en mar abierto para la identificación de parámetros de un ROV (Lack et al., 2019), o el uso de mecanismos de movimiento planar (PMM) para la estimación de coeficientes hidrodinámicos (Avila and Adamowski, 2011).

En este trabajo se empleará el vehículo de código abierto BlueRov2 Heavy, desarrollado por la compañía BlueRobotics

(BlueRobotics, 2016). Se trata de un ROV, es decir, un vehículo submarino no tripulado que se controla de forma remota mediante un operador, normalmente a través de un *joystick* o *gamepad*, utilizando un cordón umbilical (*theter*).

En los últimos años, este vehículo ha sido ampliamente utilizado en distintos trabajos de investigación, que abarcan desde el diseño de controladores para el seguimiento de trayectorias (González-García et al., 2021) y control de posicionamiento (Yang and Xing, 2021), hasta aplicaciones de limpieza de infraestructuras marinas (von Benzon et al., 2021), simulación (Ortiz-Toro et al., 2024) y colaboración entre robots submarinos (Ortiz-Toro et al., 2025).

Uno de los objetivos perseguidos a largo plazo es que el BlueRov2 Heavy sea capaz de ejecutar tareas de forma autónoma, eliminando la necesidad de un operador humano. Para ello, resulta imprescindible disponer de un modelo adecuado para el diseño del sistema de control. En la literatura se encuentran diversos estudios centrados en el modelado y la identificación de este vehículo. En todos los casos, el punto de partida es el modelo cinemático y dinámico propuesto por (Fossen, 2011), aunque se emplean distintas técnicas para identificar los parámetros hidrodinámicos. Entre ellas destacan el filtro de Kalman extendido (Aili and Ekelund, 2016), el método de mínimos cuadrados (Wu, 2018) o el uso del motor físico del entorno de simulación Gazebo (Tun et al., 2023).

Estos modelos son completos y de gran utilidad tanto para simulación como para el diseño de controladores. Sin embargo, presentan una limitación importante: cualquier modificación en la geometría del vehículo, como ocurre en el BlueRov2 utilizado en este trabajo, al que se le han añadido sensores y accesorios adicionales, obliga a identificar nuevamente los parámetros hidrodinámicos. Este proceso requiere la realización de ensayos experimentales complejos y costosos en tiempo y recursos (Avila et al., 2013). Además, dichos modelos suelen considerar el control individual de cada motor, mientras que el vehículo está diseñado para recibir comandos de tipo *joystick* en las direcciones de movimiento, encargándose él mismo de distribuir automáticamente la fuerza entre los propulsores.

Por el contrario, en (Cerrada et al., 2025b) y (Cerrada et al., 2025a) se plantea un modelo simple que relaciona las entradas de control tipo *joystick* del vehículo con las velocidades que producen en él, para el modo de funcionamiento *Estabilizar* (mantiene el *pitch* y *roll* estabilizados automáticamente para contrarrestar movimientos indeseados) del vehículo y el modo *Depth Hold* (mantiene la profundidad automáticamente, facilitando la estabilidad vertical), respectivamente. La principal ventaja que aportan estos trabajos es que las entradas de control y las velocidades son fáciles de obtener a partir de los sensores del vehículo, por lo que el diseño de los experimentos es directo.

Continuando con el trabajo presentado en (Cerrada et al., 2025b), este trabajo propone un modelo semifísico no lineal de primer orden simple para predecir las velocidades lineales del BlueRov2 en 3 grados de libertad (DOF), es decir, en *surge*, *sway* y *yaw*. La estructura del modelo semifísico combina dos submodelos: uno para modelar la resistencia al avance del vehículo submarino, cuya construcción se basa en principios físicos, y el otro, un submodelo polinomial de segundo orden, para modelar el empuje que aportan los actuadores al vehículo.

Además, se busca que el modelo aproveche las características del modo de funcionamiento *Estabilizar* y la utilización de entradas de control tipo *joystick* enviadas desde un ordenador en superficie, de manera que el diseño de los experimentos mantenga la misma simplicidad que en (Cerrada et al., 2025b). Teniendo en cuenta los buenos resultados obtenidos en estudios previos, se ha decidido utilizar la técnica de mínimos cuadrados para la estimación de los parámetros del modelo.

Por tanto, las contribuciones principales de este trabajo son:

- La identificación no lineal de un modelo semifísico para predecir las velocidades en 3 DOF del vehículo submarino.
- La determinación sencilla de los parámetros del modelo utilizando el método de mínimos cuadrados.
- La notable mejora obtenida al aplicar el modelo semifísico propuesto en este trabajo, en comparación con el modelo cinemático descrito en (Cerrada et al., 2025b), para la predicción de las velocidades del vehículo submarino en 3 DOF.

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

2. Identificación del vehículo submarino

En esta sección, se introduce el sistema experimental, los datos experimentales y la formulación de los modelos.

2.1. Sistema experimental

El vehículo submarino BlueRov2 Heavy de BlueRobotics, utilizado para la identificación no lineal de los modelos, se presenta en la Figura 1. Es un vehículo submarino sobreactuado con 8 propulsores, 4 horizontales y 4 verticales, que ofrece 6 grados de libertad (DOF) (véase la Tabla 1).

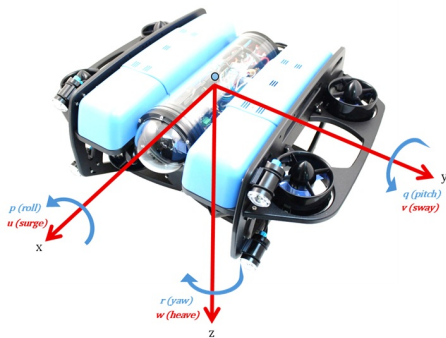


Figura 1: BlueRov2 Heavy con la nomenclatura estándar de la society of naval architects and marine engineers (SNAME).

En particular, este vehículo submarino está equipado con una cámara HD, sistemas de iluminación, un controlador de vuelo (Pixhawk PX4 autopilot) dotado de sensores como una inertial measurement unit (IMU), que ofrece la estimación de

la velocidad angular, un ordenador Raspberry 3 modelo B y un cordón umbilical que posibilita la comunicación y el control del vehículo desde un ordenador situado en la superficie. Además, como apoyo a las tareas de navegación, se ha incorporado un conjunto de sensores, entre los que sobresale el doppler velocity logger (DVL), encargado de proporcionar la medida de la velocidad lineal con respecto al fondo.

Tabla 1: Componentes de movimiento de 6 DOF para el vehículo submarino BlueRov2 Heavy.

DOF	Descripción	Velocidades
1	Traslación en dirección x (surge)	u
2	Traslación en dirección y (sway)	v
3	Traslación en dirección z (heave)	w
4	Rotación en el eje x (roll)	p
5	Rotación en el eje y (pitch)	q
6	Rotación en el eje z (yaw)	r

2.2. Datos experimentales

Antes de llevar a cabo el experimento de adquisición de datos, es indispensable configurar el vehículo submarino en el modo *Estabilizar*. En este modo, el sistema estabiliza automáticamente el *roll* y el *pitch*, y mantiene constante el *yaw* mientras no se envíe una orden de giro al vehículo, lo que facilita el control de los movimientos de traslación *surge*, *sway* y de rotación *heave*.

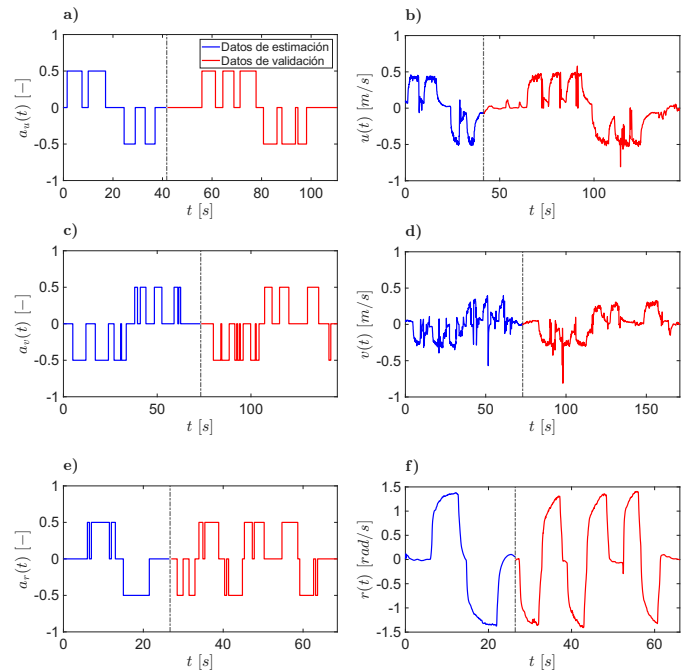


Figura 2: Datos de estimación (azul) y de validación (rojo). Entrada normalizada a_{uu} en (a) para la velocidad *surge* en (b), entrada normalizada a_v en (c) para la velocidad *sway* en (d) y la entrada normalizada a_r en (e) para la velocidad angular *yaw* en (f).

Este experimento se centra en el plano XY, es decir, los actuadores del vehículo submarino serán excitados en lazo abierto por las entradas comandadas, que consisten en señales PWM

entre 1100 y 1900 μs que en este trabajo normalizaremos al entre -1 y 1 , siendo -1 la máxima propulsión hacia atrás, 1 la máxima propulsión hacia adelante y 0 ; estar parado (Cerrada et al., 2025b). Por simplicidad, se han definido las señales de entrada normalizadas como: a_u (para *surge*), a_v (para *sway*) y a_r (para *yaw*). Debido a limitaciones de espacio en el entorno de experimentación, se procede a excitar los actuadores con señales del tipo tren de pulsos entre $-0,5$ y $0,5$ de forma manual, hasta que las salidas alcancen el estado estacionario, como se muestra en la Figura 2, evitando que el vehículo submarino choque con los límites de las instalaciones en el proceso de ensayo.

Tabla 2: Conjunto de datos de entradas normalizadas independientes para cada grado de libertad, utilizados en la estimación y la validación de los modelos.

Entradas	Muestras en estimación	Muestras en validación	Periodo de muestreo
a_u	167	277	0,5 s
a_v	293	293	0,5 s
a_r	107	169	0,5 s

El envío de las señales de entrada se realizó a través de un ordenador situado en la superficie, utilizado también para recopilar los datos de las velocidades lineales *surge* (u), *sway* (v) y la velocidad angular *yaw* (r). Las pruebas se llevaron a cabo de forma independiente, una para cada grado de libertad, generando un conjunto de datos para la estimación y la validación de los modelos, como se puede observar en la Tabla 2; y en la Tabla 3, para las entradas y salidas, respectivamente.

Tabla 3: Conjunto de datos de salidas independientes para cada grado de libertad, utilizados en la estimación y la validación de los modelos.

Salidas	Muestras en estimación	Muestras en validación	Periodo de muestreo
u	496	277	0,13 s
v	750	818	0,12 s
r	530	843	0,05 s

2.3. Formulación del modelo

En este trabajo se propone un modelo semifísico no lineal de primer orden y de estructura sencilla. Este enfoque, también conocido como modelado de caja gris o híbrido (Ljung et al., 1995), combina la resistencia al avance del vehículo submarino, obtenida a partir del conocimiento físico del proceso, con el empuje proporcionado por los actuadores, el cual se representa mediante un polinomio de segundo orden, dado que el fabricante BlueRobotics (Jehangir, 2016) recomienda ajustar la aceleración de los actuadores utilizando un polinomio no lineal.

La formulación propuesta permite calcular las ecuaciones diferenciales de las velocidades (*surge*, *sway* y *yaw*) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{u}(t) &= -\alpha_u \cdot u(t) \cdot |u(t)| + \beta_{1u} \cdot a_u^2(t) + \beta_{2u} \cdot a_u(t) \\ \dot{v}(t) &= -\alpha_v \cdot v(t) \cdot |v(t)| + \beta_{1v} \cdot a_v^2(t) + \beta_{2v} \cdot a_v(t) \\ \dot{r}(t) &= -\alpha_r \cdot r(t) \cdot |r(t)| + \beta_{1r} \cdot a_r^2(t) + \beta_{2r} \cdot a_r(t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\dot{u}(t)$, $\dot{v}(t)$ y $\dot{r}(t)$ son las derivadas con respecto al tiempo de la velocidad en *surge* $u(t)$, la velocidad *sway* $v(t)$ y la velocidad angular *yaw* $r(t)$, respectivamente. Los parámetros α_u , α_v y α_r son los coeficientes del submodelo de la resistencia al avance; y β_{iu} , β_{iv} y β_{ir} , siendo $i = 1, 2$, los coeficientes del submodelo polinomial que modela el empuje de los actuadores.

En la Tabla 4 se presentan los valores de los parámetros que componen el modelo, los cuales fueron estimados a partir de los datos medidos experimentalmente (véase la Figura 2), utilizando la técnica de mínimos cuadrados.

Tabla 4: Valores de los parámetros de los modelos semifísicos.

Parámetro	<i>surge</i> (u)	<i>sway</i> (v)	<i>yaw</i> (r)
α	5,9157	4,5435	1,3775
β_1	-0,2788	0,0736	0,0006
β_2	1,9669	0,5996	4,3319

3. Resultados

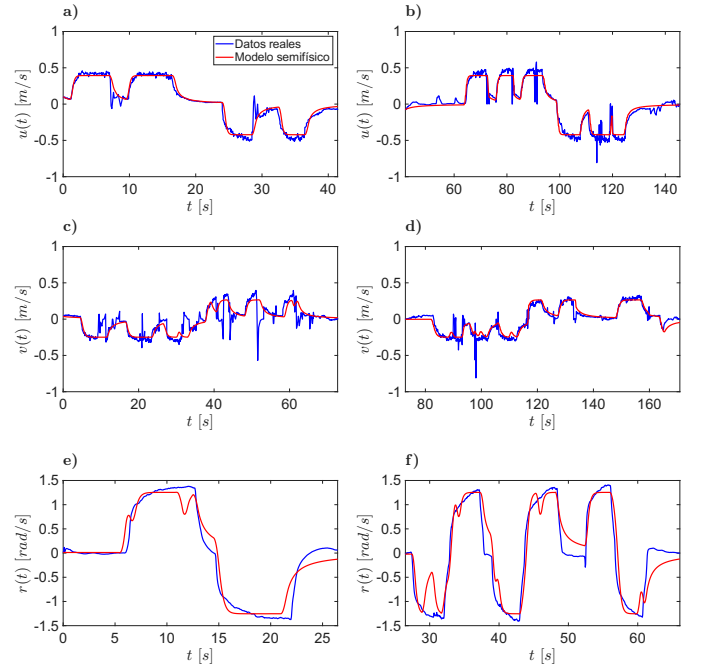


Figura 3: Respuesta del vehículo submarino BlueRov2 (azul) frente al modelo semifísico (rojo). En (a), (c) y (e), la velocidad en *surge*, la velocidad en *sway* y la velocidad angular en *yaw* para la estimación del modelo. En (b), (d), y (f) la velocidad en *surge*, la velocidad en *sway* y la velocidad angular en *yaw* para la validación del modelo.

Los resultados del modelo semifísico se muestran en la Figura 3, donde se presenta la respuesta del vehículo submarino (azul) junto con la del modelo semifísico (rojo), mostrando una gran capacidad de ajuste al comportamiento real del vehículo submarino, ya que el modelo fue construido combinando las ecuaciones físicas con el comportamiento no lineal de los actuadores. En la figura se puede observar la velocidad en *surge* en (a), la velocidad *sway* en (c), así como la velocidad angular *yaw* en (e) para la estimación del modelo. La ligera diferencia que se puede notar se debe a los transitorios producidos por

el propio movimiento del agua, principalmente en la velocidad *sway* en (c).

En la velocidad angular *yaw*, la diferencia resulta más evidente, dado que el vehículo submarino permanece prácticamente inmutable frente a pulsos de muy corta duración. La causa más probable es que ese cambio en la señal de control enviada no llegara a aplicarse al sistema real por retardos en las comunicaciones o por algún mecanismo de filtrado del control interno del vehículo que un modelo tan simple como (1) no puede explicar.

De igual forma, los resultados de la validación del modelo semifísico se ilustran en la Figura 3, donde se observa la gran capacidad predictiva que tiene el modelo para los datos de validación en la velocidad en *surge* (b), la velocidad en *sway* (d), así como la velocidad angular en *yaw* (f).

Para poner en contexto la bondad del modelo obtenido, se va a comparar el modelo semifísico ajustado con el modelo cinemático presentado en (Cerrada et al., 2025b). En consecuencia, para evaluar la calidad de ambos modelos, se emplea la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para cada una de las velocidades. El RMSE representa la desviación estándar de los residuos o errores de predicción y describe cómo se distribuyen dichos residuos. El cálculo del RMSE se realiza de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$RMSE_{E_u} = \left(\sum_{i=1}^{N_u} \frac{(\hat{u}_i - u_i)^2}{N_u} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$RMSE_{E_v} = \left(\sum_{i=1}^{N_v} \frac{(\hat{v}_i - v_i)^2}{N_v} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$RMSE_{E_r} = \left(\sum_{i=1}^{N_r} \frac{(\hat{r}_i - r_i)^2}{N_r} \right)^{1/2} \quad (4)$$

donde \hat{u}_i , \hat{v}_i y \hat{r}_i son los valores estimados; u_i , v_i y r_i son los valores reales, y N_u , N_v , N_r son el número de muestras utilizadas.

Para simplificar la comparación entre los dos modelos de forma objetiva, se calcula un índice de mejora que presenta la variación porcentual del RMSE del modelo semifísico frente al modelo cinemático, como sigue:

$$Mejora = \frac{RMSE_{E_{Cinemat\acute{c}o}} - RMSE_{E_{Semif\acute{c}o}}}{RMSE_{E_{Cinemat\acute{c}o}}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

donde los $RMSE_{E_{Semif\acute{c}o}}$ y los $RMSE_{E_{Cinemat\acute{c}o}}$ corresponden a los valores del RMSE de las salidas de los modelos presentados en la Tabla 5, respectivamente.

Tabla 5: Valores del RMSE y del índice de mejora del modelo semifísico frente al modelo cinemático propuesto en (Cerrada et al., 2025b) para las velocidades lineales en estimación y validación.

Modelo	RMSE en estimación [$u - v - r$]	RMSE en validación [$u - v - r$]
Semifísico	0,061 - 0,083 - 0,214	0,070 - 0,065 - 0,313
Cinemático	0,086 - 0,106 - 0,409	0,121 - 0,106 - 0,429
Mejora	29 % - 22 % - 48 %	42 % - 39 % - 27 %

A partir de los valores del RMSE y el índice de mejora de los modelos presentados en la Tabla 5, se observa que el modelo semifísico es el que ofrece el mejor ajuste y rendimiento en todas las pruebas, con una mejora de entre el 22 % y el 48 % en todas las variables. Además, el resultado es consistente tanto en los datos de la fase de estimación como en la de validación para la predicción de las velocidades del vehículo submarino BlueRov2 Heavy.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo, se ha empleado un modelo semifísico para predecir los movimientos del vehículo submarino BlueRov2 en 3 grados de libertad (DOF), aprovechando el modo de funcionamiento *Estabilizar*. En concreto, el modelo identificado se utiliza para predecir las velocidades lineales en *surge*, *sway* y la velocidad angular *yaw* en lazo abierto en el plano XY. El modelo se construyó combinando la resistencia al avance del vehículo submarino con un polinomio de segundo orden, alimentado por las entradas normalizadas que representan el empuje de los actuadores.

Todos los parámetros que componen el modelo son desconocidos y fueron estimados utilizando la técnica de mínimos cuadrados. El modelo fue estimado y validado con datos medidos experimentalmente, mostrando un buen rendimiento y capacidad de predicción.

Finalmente, el modelo planteado en este trabajo se contrastó con el modelo cinemático descrito en (Cerrada et al., 2025b), utilizando como referencia el criterio del RMSE y el índice de mejora. Los resultados mostraron que el modelo propuesto ofrece una mayor precisión en la predicción de las velocidades del vehículo submarino.

Como posible línea de trabajo futuro, resultaría de interés realizar los experimentos considerando los 6 DOF, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado, aplicando diferentes tipos de señales de entrada, tales como: pseudo random sequence (PRS), pseudo random binary sequence (PRBS) y señales pseudoaleatorias en amplitud y ancho de pulso, empleando instalaciones de mayor escala que permitan obtener un conjunto de datos más eficiente.

De la misma forma, sería interesante aprovechar el entorno de experimentación para hacer distintas pruebas, cambiando la geometría del vehículo submarino y llevar a cabo una identificación en tiempo real de los parámetros de los modelos.

Asimismo, resultaría muy valioso incorporar otras técnicas de identificación de modelos no lineales, como la regresión simbólica (RS) basada en programación genética (PG), con el fin de obtener modelos más eficientes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias a la financiación recibida del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto con referencia PID2023-1465400B-C41 (NEMO4EXOAMIC).

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., Adamowski, J. C., 2011. Experimental evaluation of the hydrodynamic coefficients of a roV through morison's equation. *Ocean Engineering* 38 (17), 2162–2170.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.032
- 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
- BlueRobotics, 2016. BlueROV2: The world's most affordable high-performance roV. BlueROV2 datasheet.
URL: <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/>
- 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
- Cerrada, C., Chaos, D., Moreno-Salinas, D., Aranda, J., 2025a. Identificación del modelo para el control del BlueRov2 Heavy en Modo Depth Hold. *XLVI Jornadas de Automática*, 1–6.
DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12112
- Cerrada, C., Chaos, D., Moreno-Salinas, D., Aranda, J., 2025b. Modelo cinemático para el control del vehículo BlueRov2 Heavy en Modo Estabilizar. In: *Simposio CEA de Robótica, Bioingeniería, Visión Artificial y Automática Marina (RBVM) 2025*. pp. 1–6.
DOI: 10.64117/simposioscea.v1i1.17
- 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
- Herrero, E. R., Llata, J. R., Sainz, J. J., Velasco, F. J., Rentería, L. A., 2024a. Experiment design for model basin tests with a remotely operated vehicle. *Ocean Engineering* 307, 118215.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118215
- Herrero, E. R., Llata, J. R., Sainz, J. J., Velasco, F. J., Torrijos, P. D., 2024b. Indirect inference approach for parameter estimation of non linear manoeuvring models of a roV based on model basin trials. *Ships and Offshore Structures* 19 (10), 1676–1683.
DOI: 10.1080/17445302.2023.2275092
- Jehangir, R., 2016. Motor.set and the conversion to rpm. <https://discuss.bluerobotics.com/t/motor-set-and-the-conversion-to-rpm/226/3> [Accedido: (2026-02-25)].
- Lack, S., Rentzow, E., Jeansch, T., 2019. Experimental parameter identification for an open-frame roV: Comparison of towing tank tests and open water self-propelled tests. *IFAC-PapersOnLine* 52 (21), 271–276, 12th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2019.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.319
- Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory for the User*, 2nd Edition. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
DOI: 10.1016/S0005-1098(01)00214-X
- Ljung, L., 2010. Perspectives on system identification. *Annual Reviews in Control* 34 (1), 1–12.
DOI: 10.1016/j.arcontrol.2009.12.001
- Ljung, L., Benveniste, A., Deylon, B., Gloennec, P.-Y., Hjalmarsson, H., Juditsky, A., 1995. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview. *Automatica* 31 (12), 1691–1724.
DOI: 10.1016/0005-1098(95)00120-8
- 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
- Ortiz-Toro, C. A., Gutiérrez, A., Chaos-García, D., Cerrada-Collado, C., Luque-Nieto, M. A., Clemente-Medina, M. C., 2025. Robótica Colaborativa Marina: Explorando Escenarios con NauSim y YOLO. *XLVI Jornadas de Automática*, 1–6.
DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12260
- 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
- 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