

Diseño experimental en lazo cerrado para estimación de parámetros de ROVs

Revestido-Herrero, E.^{a,*}, Sainz, J.J^a, Arce, J.J^a, Alonso-Renteria, L.^a, Llata, J.R.^a

^a Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros, s/n, Santander, 39005, España.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología de diseño experimental en lazo cerrado para la identificación de modelos no lineales de maniobra de vehículos teleoperados remotamente (ROVs). El enfoque propuesto se basa en simulaciones Monte Carlo y en el análisis de sensibilidad paramétrica, con el objetivo de mejorar la exactitud y la eficiencia en la estimación de parámetros hidrodinámicos, garantizando al mismo tiempo una operación segura dentro de áreas de ensayo espacialmente restringidas. El diseño experimental se fundamenta en maniobras tipo zig-zag ejecutadas en lazo cerrado y parametrizadas mediante un conjunto de puntos (waypoints), los cuales se optimizan para maximizar la sensibilidad de los parámetros del modelo. La metodología se valida mediante estudios en simulación y mediante ensayos reales en mar abierto realizados en la Bahía de Santander. Los resultados muestran una reducción significativa de la varianza de los parámetros estimados y una mejora sustancial en la capacidad predictiva del modelo en comparación con configuraciones experimentales no optimizadas, demostrando la aplicabilidad del enfoque propuesto en escenarios reales de robótica marina.

Palabras clave: Identificación en lazo cerrado, Diseño experimental, Identificación de sistemas no lineales, Métodos Monte Carlo, Vehículos autónomos.

Closed-Loop Experimental Design for Parameter Estimation of ROVs

Abstract

This work presents a closed-loop experimental design methodology for the identification of nonlinear maneuvering models of remotely operated vehicles (ROVs). The proposed approach is based on Monte Carlo simulations and parametric sensitivity analysis, with the aim of improving the accuracy and efficiency of hydrodynamic parameter estimation while ensuring safe operation within spatially constrained testing areas. The experimental design is based on closed-loop zig-zag maneuvers parameterized through a set of waypoints, which are optimized to maximize the sensitivity of the model parameters. The methodology is validated through simulation studies and real open-water trials conducted in the Bay of Santander. The results show a significant reduction in the variance of the estimated parameters and a substantial improvement in the model's predictive capability compared to non-optimized experimental configurations, demonstrating the applicability of the proposed approach in real marine robotics scenarios

Keywords: Closed-loop identification, Experiment design, Nonlinear system identification, Monte Carlo methods, Recursive identification, Autonomous vehicles

1. Introducción

Los vehículos teleoperados remotamente (ROVs) desempeñan un papel esencial en numerosas aplicaciones marinas, incluyendo la inspección de infraestructuras offshore, operaciones de mantenimiento, energías renovables marinas y misiones de intervención submarina. El desarrollo de sistemas avanzados de control, navegación y posicionamiento para este tipo de vehículos requiere modelos dinámicos exactos que representen

adecuadamente su comportamiento hidrodinámico no lineal.

Diversos estudios que abordan la estimación de parámetros para modelos no lineales de maniobra adoptan técnicas de diseño experimental basadas en estudios de sensibilidad en los parámetros (Blanke and Knudsen, 1999, 2006; Revestido Herrero et al., 2012, 2024). Estos enfoques se apoyan en maniobras estándar de buques, en estrategias de excitación alternativas a las pruebas convencionales de zig-zag, o en modificaciones de entrada específicamente diseñadas para experimentos

en canales o tanques de pruebas. El diseño experimental basado en sensibilidad ofrece una interpretación geométrica clara y presenta una menor sensibilidad al ruido de medición, lo que lo hace particularmente atractivo para la identificación de modelos de maniobra. En comparación con los criterios clásicos de diseño óptimo, como aquellos basados en matrices de covarianza o de información de Fisher (Goodwin and Payne, 1977; Ljung, 1987; Söderström and Stoica, 1994), los métodos basados en sensibilidad evitan supuestos restrictivos, se alinean más estrechamente con la intuición física y no se limitan a modelos lineales en tiempo discreto.

Dentro de la literatura sobre robótica marina, la identificación de sistemas para Vehículo submarino autónomo (AUVs) y ROVs ha sido ampliamente estudiada; sin embargo, la mayoría de los enfoques se basan en maniobras predefinidas o en excitación en lazo abierto. Por ejemplo, en (Zhang et al., 2021) se aplican entradas aleatorias de banda ancha para la identificación basada en datos, mientras que en (Sørensen et al., 2022) se investiga la excitación multieje bajo movimiento no restringido.

A pesar de estas contribuciones, el diseño de experimentos para modelos no lineales de maniobra que operan en lazo cerrado y dentro de entornos de aguas abiertas con restricciones espaciales sigue siendo en gran medida inexplorado. Los métodos existentes de diseño óptimo de entradas suelen asumir operación en lazo abierto, permiten trayectorias que violan restricciones de seguridad o espaciales, o requieren excitación del estado completo, lo cual resulta inviable para vehículos subacuáticos. En consecuencia, el desarrollo de estrategias de diseño experimental que garanticen simultáneamente la seguridad, respeten las limitaciones espaciales y mejoren la identificabilidad de los parámetros continúa siendo un desafío abierto.

Como se ha indicado en el párrafo anterior, la identificación de parámetros hidrodinámicos para modelos de maniobra se ha abordado tradicionalmente mediante experimentos en lazo abierto y señales de excitación predefinidas. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones significativas desde un punto de vista práctico: puede comprometer la seguridad del vehículo, dificulta la operación en áreas restringidas y, en muchos casos, no garantiza una excitación suficiente de todos los parámetros del modelo. Con el fin de superar estas limitaciones, este trabajo propone una metodología de diseño experimental en lazo cerrado que integra restricciones espaciales y criterios de seguridad, permitiendo la obtención de datos altamente informativos durante ensayos realistas en mar abierto. Además de lo anteriormente comentado, la metodología y los conceptos tratados en este artículo pueden ser muy útiles en asignaturas de regulación y de control donde se adquirirá conocimientos de modelos de maniobra y diseño de experimentos para ingenieros en el marítimo.

2. Modelo dinámico de maniobra

El comportamiento dinámico del ROV se describe mediante un modelo de maniobra no lineal de seis grados de libertad, formulado en los marcos de referencia NED y cuerpo. El modelo incluye los efectos de masa rígida y masa añadida, términos de Coriolis, fuerzas restauradoras debidas a la gravedad y flotabilidad, así como fuerzas de amortiguamiento hidrodinámico lineales y no lineales (Fossen, 2002, 2011; von Benzon et al.,

2022):

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

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v}. \quad (2)$$

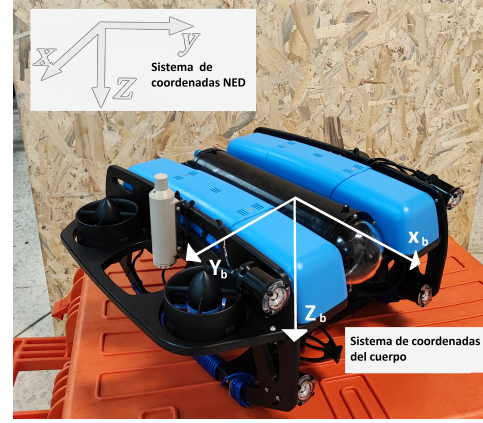


Figura 1: Imagen del ROV

Donde $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ representa la posición y los ángulos de Euler expresados en el sistema NED, $\boldsymbol{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$ denota las velocidades lineales y angulares expresadas en el sistema BODY, y $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ corresponde a las fuerzas y momentos generados por los propulsores. La matriz \mathbf{M} considera los efectos del cuerpo rígido y de las masas añadidas, $\mathbf{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v}$ representa los términos de Coriolis y centrípetos, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ denota las fuerzas y momentos de restitución, y $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ es la matriz de transformación entre sistemas de coordenadas. El término $\mathbf{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v}$ modela las fuerzas hidrodinámicas de amortiguamiento, incluyendo contribuciones lineales y no lineales. Para más información sobre las matrices que componen el modelo de maniobra no lineal de seis grados consultar (von Benzon et al., 2022).

3. Metodología de diseño de experimentos

La estimación exacta de los parámetros asociados a estos términos es fundamental para garantizar la fidelidad del modelo. No obstante, la calidad de las estimaciones depende directamente del contenido informativo de los datos experimentales, el cual está fuertemente condicionado por el tipo de maniobras y trayectorias ejecutadas durante los ensayos.

El problema abordado en este trabajo consiste en diseñar experimentos que maximicen la sensibilidad y la identificabilidad de los parámetros del modelo, manteniendo la operación del ROV en lazo cerrado y respetando restricciones espaciales propias de entornos reales de operación. La metodología propuesta se basa en el diseño de ensayos tipo zig-zag ejecutados en lazo cerrado, donde las trayectorias del vehículo se definen mediante un conjunto parametrizado de puntos de paso (way-points). Estos puntos determinan la geometría de las maniobras y, por tanto, el nivel de excitación dinámica inducido en el sistema.

Para evaluar la calidad de cada configuración experimental, se emplean simulaciones de Monte Carlo que permiten analizar múltiples realizaciones del sistema bajo distintas condiciones iniciales y variaciones paramétricas. Para cada conjunto de waypoints se calculan métricas de sensibilidad basadas en la teoría de sensibilidad paramétrica, las cuales cuantifican la capacidad del experimento para excitar adecuadamente los parámetros del modelo. El proceso de diseño experimental busca identificar el conjunto de waypoints que maximiza dichas métricas de sensibilidad, sujeto a restricciones espaciales que garantizan que el experimento pueda ejecutarse de forma segura en áreas de ensayo limitadas.

Algoritmo 1: Diseño Experimental Basado en Simulaciones de Monte Carlo para Pruebas Zig-Zag en Lazo Cerrado.

EntradaS: K simulaciones de Monte Carlo, l límites espaciales, t_o instante inicial, t_f instante final, $\mathcal{W}^{(k)}$ secuencia de way-points

• **Inicializa way-points y el número de realizaciones de Monte Carlo**

for $k \leftarrow 1$ to K do

- Generar aleatoriamente los way-point de $\mathcal{W}^{(k)}$ dentro de los límites espaciales l .
- Simular la prueba zig-zag en lazo cerrado desde t_o hasta t_f .
- Calcular los parámetros de sensibilidad hidrodinámica según la sección 3.1.

• **Representar gráficamente los parámetros de sensibilidad.**

• **Encontrar una realización que satisfaga las condiciones establecidas en la sección 3.1.**

• **Estimar los parámetros hidrodinámicos de la ecuación 1 con el way-point seleccionado en el paso anterior.**

3.1. Sensibilidad paramétrica y eficiencia del estimador

El análisis de sensibilidad paramétrica se apoya en el estudio del Hessiano del modelo con respecto a los parámetros a estimar, lo que permite evaluar tanto la magnitud de la sensibilidad como posibles problemas de correlación entre parámetros. Además, se establece una relación directa entre la sensibilidad paramétrica y la varianza de los estimadores mediante el límite inferior de Cramér–Rao. Este análisis demuestra que un incremento en la sensibilidad conduce a una reducción de la varianza de los parámetros estimados, mejorando así la eficiencia del estimador por mínimos cuadrados utilizado en el proceso de identificación de este trabajo.

Los parámetros de sensibilidad se calculan mediante las expresiones que se pueden encontrar en las contribuciones de Blanke and Knudsen (1999, 2006) y cuya denominación de los parámetros se enumera a continuación:

- S_{imin} : Sensibilidad mínima de cada parámetro.
- R_i : Ratio de sensibilidad de cada parámetro.
- S_{min} : Sensibilidad mínima del conjunto de parámetros.
- R_{min} : Ratio de sensibilidad mínima del conjunto de parámetros.

Se ha de encontrar la relación que satisfaga:

- S_{imin} tan grande como sea posible.
- R_i : tan cerca de 1 como sea posible.
- S_{min} : tan grande como sea posible.
- R_{min} : tan cerca de 1 como sea posible.

4. Resultados experimentales

La metodología propuesta se lleva a cabo mediante dos estudios complementarios. En primer lugar, se presentan resultados obtenidos a partir de datos simulados, donde se compara el desempeño del diseño experimental optimizado con configuraciones iniciales de way-points no optimizadas. Los resultados muestran mejoras significativas en la exactitud y eficiencia de los parámetros estimados de la Tabla 2 para X_u y $X_{|u|u}$.

En la Figuras 3 a 5 se muestran 1000 realizaciones distintas donde se representan los parámetros de sensibilidad indicadas en la sección 3.1 para el desplazamiento de avance. En la realización 751, se observan los parámetros de sensibilidad más favorables de todo el conjunto, cuyos resultados se resumen en la Tabla 2 donde se comparan los parámetros obtenidos del conjunto de way-points original con parámetros del way-point obtenido una vez se ha aplicado el Algoritmo 3: Se observa mejoras en casi todos los parámetros.

En segundo lugar, el conjunto de way-points obtenido en el diseño experimental se aplica a ensayos reales en mar abierto realizados en la Bahía de Santander. Los datos obtenidos se utilizan para estimar los parámetros del modelo de maniobra del ROV, y el modelo resultante se valida posteriormente utilizando un conjunto de datos independiente, confirmando su capacidad para reproducir con exactitud la dinámica del vehículo. Los resultados se pueden observar en la Figura 6 y la Tabla 3.

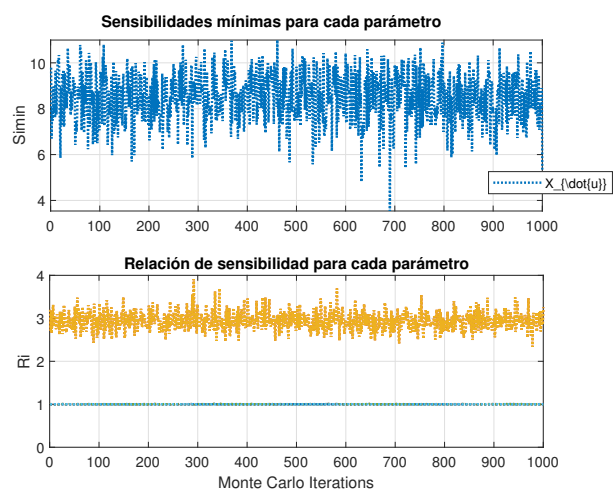


Figura 2: Evolución del parámetro de sensibilidad de la masa añadida para 1000 realizaciones de Monte Carlo en x , (S_{imin} tan grande como sea posible, R_i : tan cerca de 1 como sea posible).

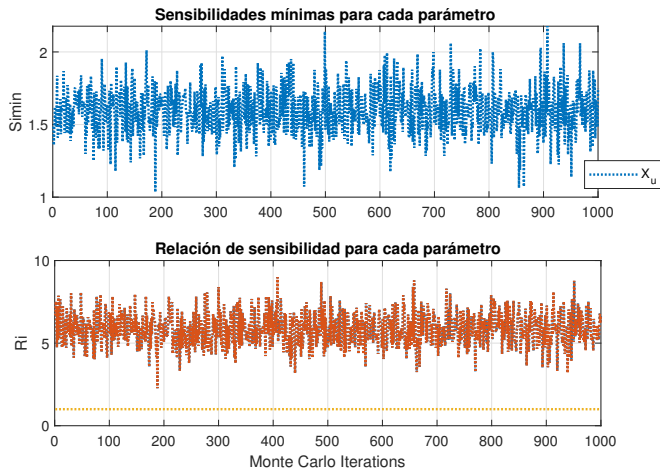


Figura 3: Evolución del parámetro de amortiguamiento lineal para 1000 realizaciones de Monte Carlo en surge, (S_{\min} tan grande como sea posible, R_i : tan cerca de 1 como sea posible).

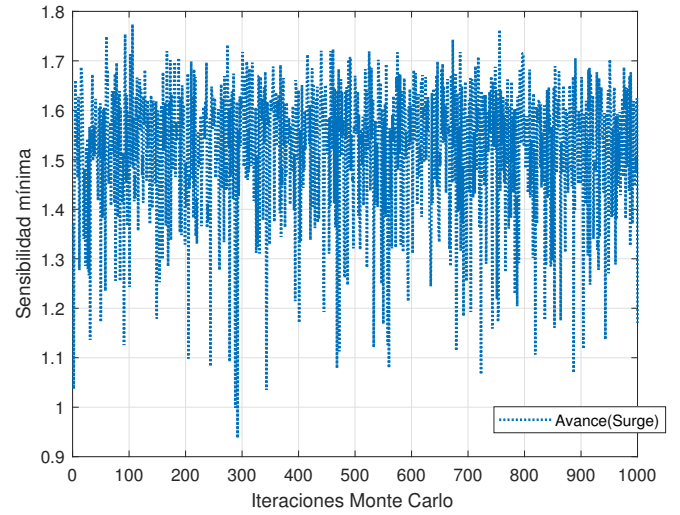


Figura 5: Evolución de los parámetros de sensibilidad mínima para cada grado de libertad (1000 realizaciones de Monte Carlo, S_{\min} : tan grande como sea posible).

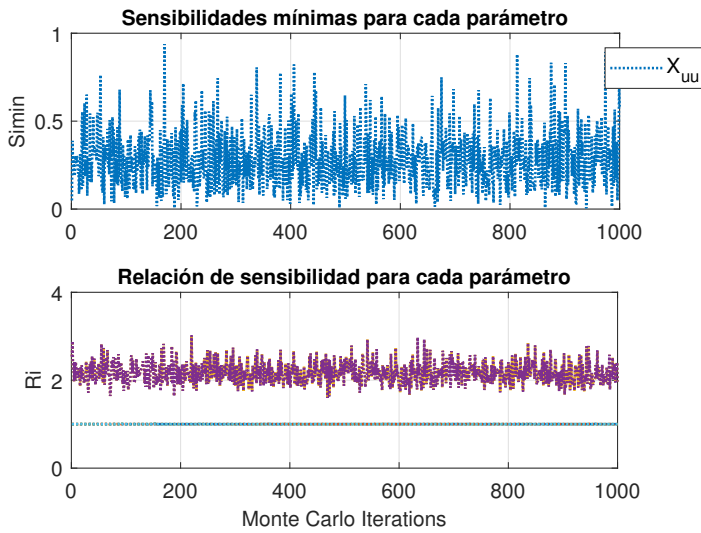


Figura 4: Evolución del parámetro de sensibilidad del amortiguamiento no lineal para 1000 realizaciones de Monte Carlo en X_u , (S_{\min} tan grande como sea posible, R_i : tan cerca de 1 como sea posible).

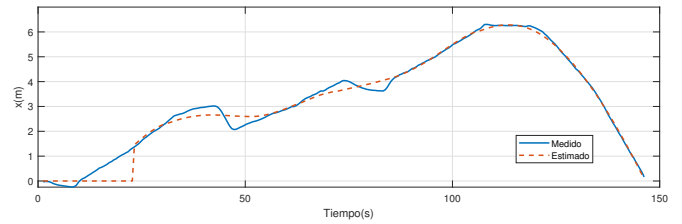


Figura 6: Desplazamiento medido en metros y estimación del desplazamiento en metros

Tabla 1: Comparativa con los resultados del parámetro de sensibilidad para los way points iniciales y los obtenidos con el diseño experimental.

Parámetro Sensibili.	Avance (surge)	Way points $\mathcal{W}^{(k)}$ Iniciales
S_{\min}	1.3701	(0, 0, 0, 0, 0)
R	15.2090	(1, 1, 1, 0, 0, 10)
$S_{i \min}$	$X_{ii} \ Y_{ii} \ Z_{ii}$ 9.8 1.4 6.4	(2, -1, 0, 0, 0, -10)
R_i	1.0 3.2 3.2	(3, 1, 1, 0, 0, 10)
		(4, -1, 0, 0, 0, -10)
		(5, 1, 1, 0, 0, 10)
Parámetro Sensibili.	Avance (surge)	Way points $\mathcal{W}^{(k)}$ Diseño Experimental
S_{\min}	1.2849	(0, 0, 3663, 0, 8837, 0, 0, 21, 8894)
R	10.9296	(1, 0, 5608, 0, 1855, 0, 0, 8, 8195)
$S_{i \min}$	$X_{ii} \ Y_{ii} \ Z_{ii}$ 6.0 1.3 1.2	(2, -0, 5016, 2, 5401, 0, 0, 20, 2298)
R_i	1.0 2.2 2.2	(3, -2, 2071, 1, 4741, 0, 0, 0, 6441)
		(4, -2, 5782, 1, 1401, 0, 0, -3, 1184)
		(5, -1, 5969, 1, 0815, 0, 0, -5, 5898)

La Figura 5 representa las sensibilidad mínimas para surge.

Tabla 2: Estudio de Monte Carlo de 1000 realizaciones que compara las entradas iniciales en zig-zag con las obtenidas mediante el diseño experimental.

	Entrada estandar		Min Input	
	Bias	Std. dev.	Bias	Std. dev.
X_{ii}	0.0009	0.0014	0.0017	0.0024
X_{uu}	0.8140	0.1278	0.2750	0.0907
$X_{ u }$	0.0004	0.0079	0.0001	0.0010

Tabla 3: Resultados estadísticos de la validación del modelo para los seis grados de libertad (datos reales del ROV diferentes a los utilizados en la identificación).

Variable	R^2
Posición x	97.92

5. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología de diseño experimental en lazo cerrado para la identificación de modelos no lineales de maniobra de ROVs, basada en simulaciones Monte Carlo y análisis de sensibilidad paramétrica. El enfoque propuesto permite mejorar significativamente la eficiencia y la exactitud de la estimación de parámetros, garantizando al mismo tiempo una operación segura dentro de áreas de ensayo restringidas. Los resultados obtenidos en simulación y en ensayos reales en mar abierto confirman la validez y aplicabilidad práctica de la metodología, constituyendo una contribución relevante para la comunidad de robótica marina y vehículos submarinos.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido apoyo financiero parcial del proyecto TED2021-132158B-I00 Evolutionary Monitoring with Unmanned Underwater Vehicles for the Maintenance of the Bottom and Anchorages of Offshore Wind Farms, financiado por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033 (Fig. 11) y por la Unión Europea – Next Generation EU/PRTR. Apoyo adicional ha sido

proporcionado a través del proyecto Intelligent and Collaborative Control of Unmanned Underwater Vehicles for the Dynamic Positioning of Floating Marine Structures at Scale, financiado en el marco del Programa de Ayudas por Contrato del Gobierno de Cantabria–UC.

Referencias

- Blanke, M., Knudsen, M., 1999. Optimized experiment design for marine systems identification. Vol. vol.17. Kidlington, UK, pp. 575 – 80.
- Blanke, M., Knudsen, M., 2006. Efficient parameterization for grey-box model identification of complex physical systems. Amsterdam, Netherlands, pp. 6 pp. –.
- Fossen, T., 2002. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics.
- Fossen, T. I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley and Sons, Ltd.
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119994138.fmatter>
- Goodwin, G., Payne, R., 1977. Dynamic system identification: Experiment design and data analysis.
- Ljung, L., 1987. System identification: theory for the user.
- Revestido Herrero, E., Gonzalez, F. J. V., García, E. L., Perez, E. M., 2012. Diseño de experimentos para la estimación de parámetros de modelos de maniobra lineales de buques 9 (2), 123–134.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791212000076>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.02.006>
- Revestido Herrero, E., Llata, J. R., Sainz, J. J., Velasco, F. J., Renteria, L. A., 2024. Experiment design for model basin tests with a remotely operated vehicle 307, 118215.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824015531>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118215>
- Söderström, T., Stoica, P., 1994. System Identification. Prentice-Hall.
- Sørensen, F., Johansen, T. A., Fossen, T. I., 2022. Robust multi-axis excitation for marine vehicle model identification 10 (4), 510.
DOI: 10.3390/jmse10040510
- von Benzon, M., Sorensen, F. F., Uth, E., Joffroy, J., Liniger, J., Pedersen, S., 2022. An open-source benchmark simulator: Control of a bluerov2 underwater robot 10 (12).
URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/12/1898>
DOI: 10.3390/jmse10121898
- Zhang, C., Li, B., Yu, X., 2021. Broadband excitation-based hydrodynamic parameter identification for autonomous underwater vehicles 232, 109135.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109135