

Jornadas de Automática

Controlador adaptativo de ROV para la monitorización de estructuras marinas.

Sainz, J.J.^{a,*}, Becerra, V.^b, Revestido, E.^c, Llata, J.R.^a, Alonso, L.^a, Torre, C.^a

^a Departamento de tecnología electrónica, ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros, s/n, 39005 Santander, Spain.

^b School of Energy and Electronic Engineering, University of Portsmouth, Portsmouth, PO1 3DJ, United Kingdom.

^c Departamento de tecnología electrónica, ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Cantabria, C/Gamazo 1, 39004 Santander, Spain.

To cite this article: Sainz, J.J., Becerra, V., Revestido, E., Llata, J.R., Alonso, L., Torre, C. 2024. Adaptive ROV controller for monitoring marine structures. *Jornadas de Automática*, 45.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10807>

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de un controlador adaptativo L1 para el posicionamiento dinámico de un “*Vehículo subacuático teleoperados a Distancia*” (ROV) que puede monitorizar la obra viva y anclajes de parques eólicos marinos. Para ello, se considera el modelo no lineal de 6 grados de libertad de los ROVs. Se han realizado simulaciones con niveles de ruido de instrumentación estándar a bordo de un ROV para determinar el correcto funcionamiento del sistema con el controlador implementado, teniendo en cuenta las salidas de las posiciones y las señales de control comandadas a los propulsores. Se puede emplear esta investigación con fines docentes para la capacitación de los ingenieros responsables del control dinámico de ROVs en la sintonización e implementación de los controladores.

Palabras clave: Control adaptativo, Educación continua de control en la industria, Laboratorio virtual y remoto, Posicionamiento dinámico, Vehículo submarino autónomo.

Controller for an ROV for monitoring marine structures.

Abstract

In this paper, we present the application of an adaptive L1 controller for the dynamic positioning of an “*Remotely Operated Underwater Vehicle*” (ROV) that can monitor offshore wind farm anchorages and underwater structures. For this purpose, the non-linear 6 degree-of-freedom model of ROVs is considered. Simulations have been carried out with standard instrumentation noise levels on board an ROV to determine the correct operation of the system with the implemented controller, taking into account the output positions and the control signals sent to the thrusters. This research can be used for educational purposes to train engineers responsible for the dynamic control of ROVs in the tuning and implementation of the controllers.

Keywords: Adaptive control, Autonomous underwater vehicles, Continuing control education in industry, Dynamic positioning, Kalman filtering techniques in marine systems control, Virtual and remote labs.

1. Introducción

En las últimas décadas, los “*Vehículos Submarinos no Tripulados*” (UUV) y los ROVs se han utilizado ampliamente para una amplia variedad de aplicaciones, en entornos submarinos (Schjølberg, 2015), (Fay,), (Sainz, 2022). Este tipo de aplicaciones están relacionadas con temas como la exploración y la investigación, la industria de la energía en alta mar, la arqueología subacuática, el monitoreo ambiental,

las operaciones de búsqueda y rescate, la inspección de infraestructura, la defensa y la seguridad, la acuicultura y la pesca, la filmación submarina y la producción de medios, la exploración de entornos peligrosos, el mantenimiento de tuberías y la instalación de cables. En estas aplicaciones, el uso de ROV exige una gestión precisa de los sistemas de “*Posicionamiento Dinámico*” (DP) o una asistencia precisa al operador. Como resultado, se han aplicado una serie de metodologías de control en este campo. Las contribuciones

notables abarcan técnicas de control robustas como se detalla en las referencias (Hosseinnajad, 2021) y (Chin, 2018), con la notable inclusión del control difuso mencionado en la referencia (Dong, 2020). Además, se han logrado resultados excepcionales a través de técnicas que involucran el despliegue de redes neuronales, como se explora en las referencias (García-Valdovinos, 2019) y (Trslíc, P., 2020), junto con el “Control Predictivo Con Modelos No lineales” (NMPC) como se describe en la referencia (Cao, 2020).

En el presente trabajo se propone la aplicación de la metodología de control adaptativo L1 para la aplicación de DP de un ROV con fines docentes y de investigación. La citada técnica de control se ha aplicado con éxito a otros sistemas no lineales como una central nuclear, ver (Vajpayee, 2021) o estructuras marinas (Sainz, 2022). Este controlador es extremadamente robusto y compensa las perturbaciones sin perder velocidad en comparación con otros métodos (Sainz, 2023).

2. Modelo dinámico ROV

Para describir el movimiento del ROV objeto de estudio de este trabajo (Figura 1), se necesitan tres coordenadas de traslación y otras tres para los ángulos de Euler. Para estudiar el movimiento del ROV se utilizan dos sistemas de coordenadas: una coordenada se fija al vehículo que se utiliza para definir sus movimientos de traslación y rotación y otra se encuentra en la Tierra en “North East Down” (NED) para describir su posición y orientación.



Figura 1: ROV.

El modelo de maniobra no lineal puede expresarse de la siguiente forma (Fossen, 2002) (Fossen, 2011) (von Benzon, 2022):

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

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

$$y_s = v + w_n \quad (3)$$

Donde $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ es el vector de posición y ángulos de Euler, $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ es el vector de velocidades lineales y angulares, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ es el vector de fuerzas y momentos, w es el ruido de medición, M es la matriz del cuerpo rígido y la masa añadida, $C(v)v$ es el término de Coriolis, $g(\eta)$ es la matriz de restauración, $J(\eta)$ es la matriz de rotación y $D(v)v$ representa las fuerzas de

amortiguamiento hidrodinámico que son una combinación de amortiguamiento lineal y no lineal. La relación cinemática entre la velocidad v en el sistema de coordenadas fijas al cuerpo y la posición η en el sistema de coordenadas NED viene dada por:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} J_{1A} & J_{1B} & J_{1C} \\ J_{1D} & J_{1E} & J_{1F} \\ J_{1G} & J_{1H} & J_{1I} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} J_{1A} &= \cos(\psi)\cos(\theta) \\ J_{1B} &= -\sin(\psi)\cos(\phi) + \phi\cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1C} &= \sin(\psi)\sin(\phi) + \phi\cos(\psi)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1D} &= \sin(\psi)\cos(\theta) \\ J_{1E} &= \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\phi\sin(\theta)\sin(\psi) \\ J_{1F} &= -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\cos(\phi) \\ J_{1G} &= -\sin(\theta) \\ J_{1H} &= \cos(\theta)\sin(\phi) \\ J_{1I} &= \cos(\theta)\cos(\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

El resto de las matrices del modelo (1) son las siguientes: Las matrices de cuerpo rígido y la masa sumada, $M = M_{RB} + M_A$.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde m es la masa del vehículo, $I_c = \text{diag}\{I_x, I_y, I_z\}$ es el momento de inercia. La matriz de masa añadida es M_A .

$$M_A = -\text{diag}\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\} \quad (9)$$

La matriz de Coriolis $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$.

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & -I_z r & -I_y q \\ -mw & 0 & mu & I_z r & 0 & I_x p \\ mv & -mu & 0 & I_y q & -I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}W & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ mv & -mu & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Las matrices de amortiguación $D(v) = D_l + D_n(v)v$.

$$D_l = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (12)$$

Donde θ_{max} es el límite de la norma y ε_θ es la tolerancia en la proyección, P_m es la solución de la ecuación algebraica de Lyapunov. Finalmente, Υ es la ganancia de adaptación. Tan pronto como se han estimado las perturbaciones, se da un paso preliminar para calcular la variable intermedia $\hat{\eta}(s)$:

$$\hat{\eta}(s) = \omega_0 u_a(s) + \hat{\eta}_1(s) \quad (27)$$

Donde $\hat{\eta}_1(s) = \hat{\sigma}_1(s)$.

Por lo tanto, la ley de control adaptativo tiene la siguiente estructura:

$$u_a(s) = -(\hat{\eta}(s) - r_f(s)) \quad (28)$$

Donde

$$r_f(s) = r(s) \times K_g \quad (29)$$

K_g corresponde al valor del filtro de avance. El filtro de avance se establece de manera que el sistema total tenga las condiciones adecuadas para su control con el desacoplamiento de las señales.

$$K_g = -(CA_m^{-1}B_m)^{-1} \quad (29)$$

4. Resultados y discusión.

Se han llevado a cabo una serie de simulaciones para estudiar el comportamiento del sistema con el controlador adaptativo L1 implementado y verificar el correcto funcionamiento del sistema. Las simulaciones se han llevado a cabo en el entorno Matlab-Simulink. El periodo de muestreo utilizado es de 0,1s.

En la simulación, el vector de referencia se estableció en $Ref(t) = [1m, 1m, 1m, 0m, 0m, 0m]^T$. Las matrices de filtros de Kalman se ajustaron usando los siguientes valores:

$$Q = \text{diag}([10, 10, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1])$$

$$R = \text{diag}([0.001, 0.001, 0.0001, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1])$$

Las matrices de sintonización LQR se ajustan de la siguiente manera:

$$Q_{LQR} = \text{diag}([1.93 \times 10^3, 0.3050 \times 10^3, 0.012 \times 10^3, 0.005 \times 10^3])$$

$$R_{LQR} = \text{diag}([0.0035, 0.0015, 0.0002, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5])$$

Los parámetros de sintonización del controlador L1-Adaptativo K_a , Υ y ε , se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de ajuste del control adaptativo L1

K_a	Υ	ε
[2000,0,3786,0,1]	[0.1,15,12]	[0,030,30,3]

Se puede ver en la Figura 3, que representa la posición del ROV en x , que el controlador es capaz de posicionar el vehículo de acuerdo con la referencia. No hay error de estado estacionario y no hay sobreimpulso u oscilaciones que puedan provocar colisiones con objetos u otros vehículos submarinos.

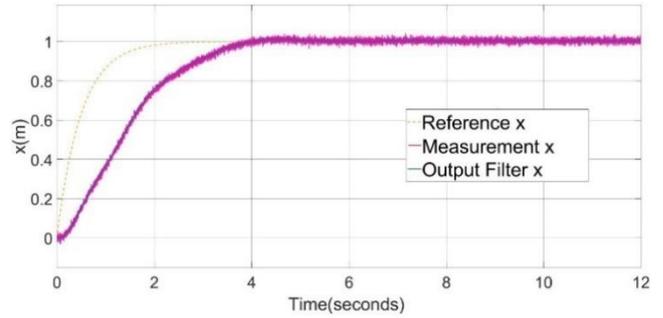


Figura 3: Resultados del ROV con L1 adaptativo; Posición en X.

La salida x de la posición está contaminada por el ruido correspondiente a los sensores, como ya se ha mencionado. Se puede ver en la Figura 4 que el KF realiza un filtrado aceptable de las señales.

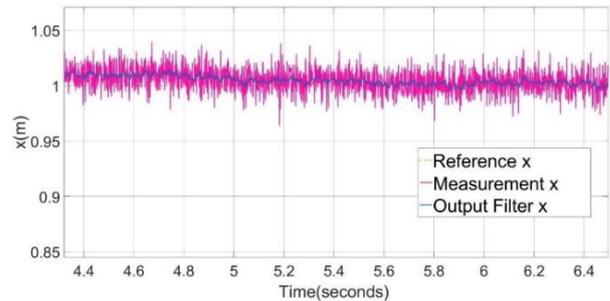


Figura 4: Resultados del ROV con L1 adaptativo; Posición en X con zoom.

Cabe destacar que los vehículos submarinos incorporan diferentes propulsores para su movimiento. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta las señales de control que tendrán un impacto en los actuadores para garantizar que la aplicación del controlador en el vehículo sea válida y que los resultados sean aceptables. Se puede observar en las Figuras 5, 6 y 7 que las señales de control no presentan oscilaciones innecesarias que puedan dañar los propulsores. Además, los esfuerzos de control son pequeños.

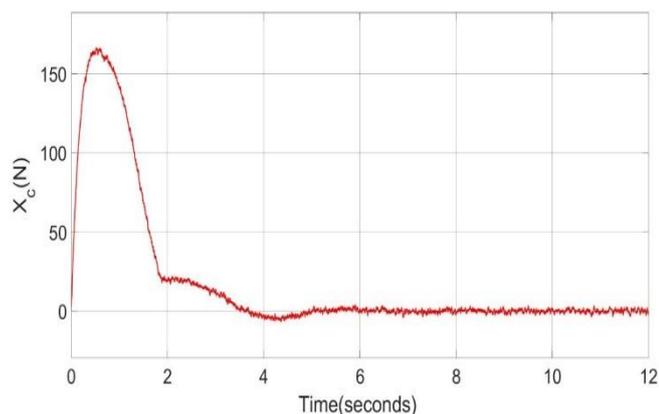


Figura 5: Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control X_c (N) calculada por el controlador

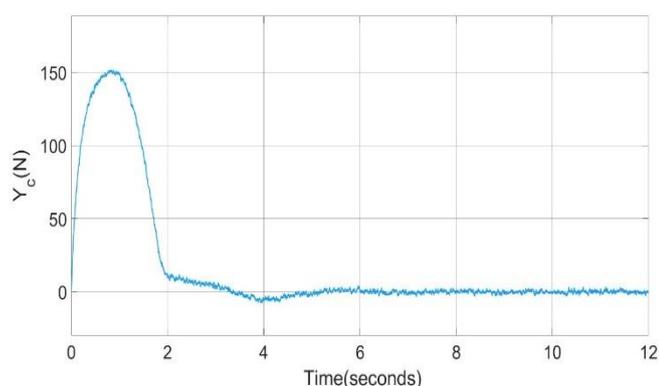


Figura 6: Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control Y_c (N) calculada por el controlador.

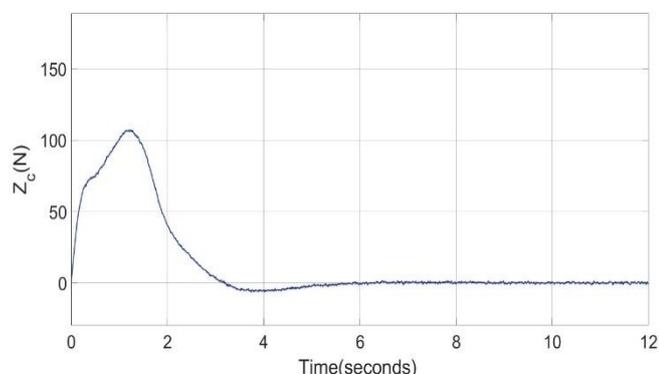


Figura 7: Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control Z_c (N) calculada por el controlador.

Es necesario destacar que el control propuesto genera mejores resultados que los que se obtienen con un controlador tradicional proporcional, integral y derivativo (PID).

Por todo lo anterior, se considera que el controlador L1 Adaptive implementado es correcto y produce excelentes resultados.

5. Aplicación docente

En las diferentes titulaciones relacionadas con la ingeniería en general y la ingeniería naval en particular, es necesario dominar el modelado matemático que representan la dinámica real, en este caso, de los vehículos subacuáticos. Por otra parte, la implementación y ajuste de controladores destinados al posicionamiento dinámico de vehículos es parte indispensable de los conocimientos que este tipo de profesionales deben adquirir para afrontar con solvencia los retos en el área de control automático de los ROV en el presente y el futuro cercano. Con el ejemplo de aplicación presentado de un controlador avanzado para el posicionamiento dinámico destinado a la supervisión de obras y estructuras marinas haciendo uso de un ROV, se adquirirá por parte de los alumnos conocimientos relativos al modelado dinámico de vehículos marinos. Además, se adquirirán conocimientos de implementación y ajuste de controladores avanzados en simulaciones matemáticas, que sirven para evaluar el correcto funcionamiento del controlador y el futuro comportamiento de un vehículo marino antes de su implementación y prueba realizadas en ensayos reales. Los conocimientos matemáticos previos necesarios para su implementación incluyen el uso de vectores y matrices, transformadas de Laplace, y ecuaciones diferenciales ordinarias. Es necesario también dominar los aspectos físicos inherentes al modelo matemático, que representa la dinámica real del sistema. Por último, se debe tener conocimientos previos del entorno Matlab-Simulink donde se realizan la implementación matemática y las simulaciones computacionales.

6. Conclusiones

En el presente trabajo, se propone un controlador adaptativo L1 para la aplicación DP de ROV. El control dinámico se realiza en presencia de perturbaciones correspondientes a un nivel de ruido estándar de este tipo de instrumentación del vehículo. Además, se ha implementado un KF en el sistema para filtrar el ruido del sensor.

A partir de los resultados de la simulación, se puede observar que el controlador implementado ha posicionado correctamente el ROV en el punto de referencia. No hay oscilaciones ni sobreimpulsos en el posicionamiento. Además, las señales de control del controlador son adecuadas, ya que no hay oscilaciones o saturaciones peligrosas para los actuadores del sistema. Por todo lo anteriormente mencionado, se puede concluir que el controlador implementado es apto para el posicionamiento dinámico de este tipo de vehículos submarinos y puede ser aplicado en ellos cuando se requiera posicionarlo adecuadamente. A través de este ejemplo se pueden adquirir conocimientos tanto del modelado dinámico de los ROV como de la implementación matemática de controladores avanzados para el posicionamiento dinámico de ROV destinados a la monitorización de la obra viva y anclajes de parques eólicos marinos.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente apoyado a través del proyecto TED2021-132158B-I00 Monitorización Evolutiva con Vehículos Submarinos No Tripulados para el Mantenimiento del Fondo y Anclajes de Parques Eólicos Marinos financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next Generation EU/PRTR Figura 8 y a través del proyecto Control de Vehículos Submarinos No Tripulados para la Supervisión de Estructuras para Obras Marítimas Fondeadas. Controladores Avanzados e Inteligentes y Supervisión 3D financiados por el Ministerio de Universidades, Igualdad, Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria.



Figura 8: MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 and the European Union - Next GenerationEU/PRTR

Referencias

- Cao, C., Hovakimyan, N., 2008. Design and analysis of a novel H_1 adaptive control architecture with guaranteed transient performance. *IEEE transactions on automatic control* 53, 586–591.
- Cao, Y., Li, B., Qian, L., Stokes, A. A., Ingram, D. M., Kiprakis, A., 2020. A Nonlinear Model Predictive Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles With Disturbance Rejection. *IEEE access*, Vol. 8 p. 158622158634
- Chin, C. S., Lin, W. P., 2018. Robust Genetic Algorithm and Fuzzy Inference Mechanism Embedded in a Sliding Mode Controller for an Uncertain Underwater Robot. in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 2, pp. 655-666, April 2018.
- Dong, M.; Li, J. and Chou, W., 2020. Depth control of ROV in nuclear power plant based on fuzzy PID and dynamics compensation. *Microsystem technologies : sensors, actuators, systems integration*, Vol. 26, No. 3 p. 811-821
- Fay, D., Stanton, N., Roberts, A. Exploring ecological interface design for future rov capabilities in maritime command and control, pp. 264 – 73. URL:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93885-1_24.
- García-Valdovinos, L.G., Fonseca-Navarro, F., Aizpuru-Zinkunegi, J., Salgado-Jimenez, T., Gómez-Espinosa, A., Cruz-Ledesma, J.A., 2019. Neuro-Sliding Control for Underwater ROV's Subject to Unknown Disturbances. *Sensors (Basel, Switzerland)*; 19: 2943.
- 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
- Hosseinnajad, A., Loeipour, M., 2021. Design of a Robust Observer-based DP Control System for an ROV with Unknown Dynamics Including Thruster Allocation. (Ed.) *IEEE* p. 1-6
- Hovakimyan, N., Cao, C., 2010. *L1 adaptive control theory: guaranteed robustness with fast adaptation*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Pomet, J., Praly, L., 1992. Adaptive nonlinear regulation: estimation from the lyapunov equation. *IEEE transactions on automatic control* 37, 729–740.
- Sainz, J. J., Revestido Herrero, E., Llata, J. R., F. J., 2022. Aplicación de un Unscented Kalman filter para el filtrado de las señales en un vehículo subacuático teleoperado. *XLIII Jornadas de Automática libro de actas*, pp.31-37 <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0031>
- Sainz, J. J., Becerra, V., Revestido Herrero, E., Llata, J. R., Velasco, F. J., 2023. *L1 adaptive control for marine structures*. *Mathematics (Basel)* 11, 3554.
- Schjllberg, I. and Utne, I. B., 2015. Towards autonomy in rov operations . 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV. 48, 183–188. URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315002694>,doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.030>.
- Trslc, P., Omerdic, E., Dooly, G., Toal, D., 2020. Neuro-Fuzzy Dynamic Position Prediction for Autonomous WorkClass ROV Docking. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20: 693).
- Vajpayee, V., Becerra, V., Bausch, N., Deng, J., Shimjith, S.R., Arul, A.J., 2021. L1-adaptive robust control design for a pressurized water-type nuclear power plant. *IEEE transactions on nuclear science* 68, 1381–1398.
- von Benzon, M., Sørensen, F.F., Uth, E., Jouffroy, J., Liniger, J., Pedersen, S., 2022. An open-source benchmark simulator: Control of a bluerov2 underwater robot. *Journal of marine science and engineering* 10, 1898.