

Controlador avanzado para el posicionamiento dinámico de vehículos submarinos no tripulados destinados a la monitorización de la obra viva y anclajes de parques eólicos marinos

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

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

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

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de un controlador adaptativo L1 para el posicionamiento dinámico de un ROV que para su aplicación en la monitorización de la obra viva y anclajes de parques eólicos marinos. Para ello, se considera el modelo no lineal de 6 grados de libertad de un vehículo submarino tele operado (Remotely operated vehicle: ROV). 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 los ROV en la sintonización e implementación de los controladores.

Palabras clave: Ajuste automático, Posicionamiento dinámico, Algoritmos genéticos, L1-Adaptativo Modificado, ROV

Paper Advanced controller for the dynamic positioning of unmanned underwater vehicles for the monitoring of offshore wind farm anchorages and structures.

Abstract

This paper presents the application of an adaptive L1 controller for the dynamic positioning of an ROV for its application in the monitoring of the bottom and anchorages of offshore wind farms. For this purpose, the nonlinear 6 degrees of freedom model of a remotely operated vehicle (ROV) is considered. Simulations have been performed 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 position outputs and the control signals commanded to the thrusters. This research can be used for teaching purposes to train engineers responsible for the dynamic control of ROVs in the tuning and implementation of the controllers..

Keywords: Automatic tuning, Dynamic Positioning, Genetic Algorithms, Modified L1-Adaptive, ROV.

1. Introducción

En las últimas décadas, los vehículos submarinos no tripulados (UUV) y los vehículos operados a distancia (ROV) se han utilizado ampliamente para una extensa variedad de aplicaciones, en entornos submarinos [1] [2] [3]. 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 [4] y [5], con la notable inclusión del control difuso mencionado en la referencia [6]. Además, se han logrado resultados excepcionales a través de técnicas que involucran el despliegue de redes neuronales, como se explora en las referencias [7] y [8], junto con el Control Predictivo de Modelos (NMPC) como se describe en la referencia [9].

*Autor para correspondencia: autor1@ceautomatica.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

En el presente trabajo se propone la aplicación de la metodología de control adaptativo L1 para la aplicación de DP de un ROV. La citada técnica de control se ha aplicado con éxito a otros sistemas no lineales como una central nuclear, ver [10] o estructuras marinas [3]. Este controlador es extremadamente robusto y compensa las perturbaciones sin perder velocidad en comparación con otros métodos

2. Modelo Dinámico ROV

Para describir el movimiento del ROV objeto de estudio de este trabajo (ver Figura 2.2), 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 y se utiliza para definir sus movimientos de traslación y rotación y otra se encuentra en la Tierra (NED-frame) para describir su posición y orientación.

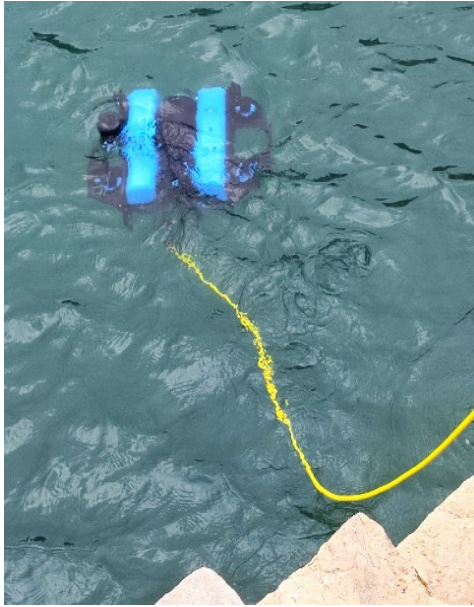


Figura 1 ROV de la casa Bluerobotics.

El modelo de maniobra no lineal puede expresarse de la siguiente forma [12] [13] [14]:

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

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

$$\dot{y}_s = v + w_n \quad (3)$$

Donde $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ es el vector de posición y ángulos de Euler, $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ son las velocidades

lineales y las velocidades angulares, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ son las fuerzas y momentos. ω 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 (North East Down) 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:

$$J_{1A} = \cos(\psi)\cos(\theta)$$

$$J_{1B} = -\sin(\psi)\cos(\phi) + \phi\cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi)$$

$$J_{1C} = \sin(\psi)\sin(\phi) + \phi\cos(\psi)\cos(\theta)\sin(\phi)$$

$$J_{1D} = \sin(\psi)\cos(\theta)$$

$$J_{1E} = \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\phi)\phi\sin(\theta)\sin(\psi)$$

$$J_{1F} = -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\theta)\sin(\psi)\cos(\phi)$$

$$J_{1G} = -\sin(\theta)$$

$$J_{1H} = \cos(\theta)\sin(\phi)$$

$$J_{1I} = \cos(\theta)\cos(\phi)$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para mas detalles sobre las matrices de la ecuación (1) correspondientes al ROV de la figura 1, ver [14].

3. L1 Control adaptativo

En esta sección, proponemos la aplicación del método de control adaptativo L1 al DP del ROV en la Figura 2. Para ello, se ha empleado el enfoque de control adaptativo descrito en [15], [16] en combinación con un controlador gaussiano cuadrático lineal (LQG). Se ha implementado siguiendo la estructura descrita en [10], que utiliza este sistema para el control de una central nuclear.

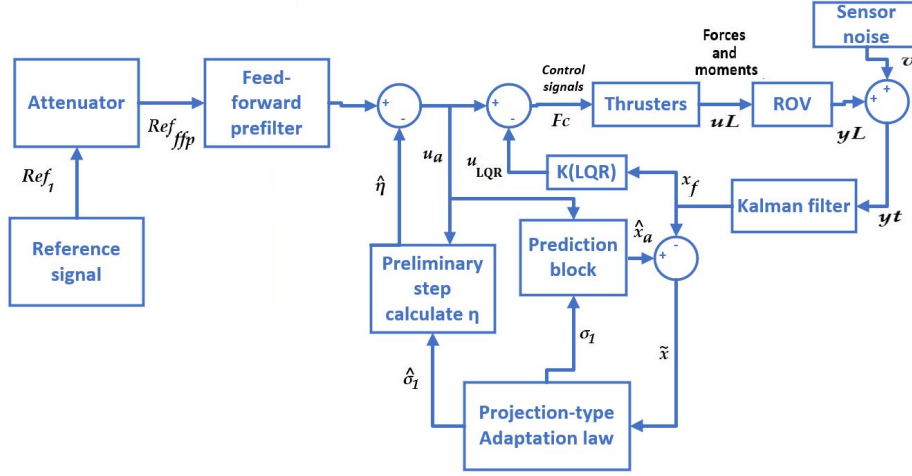


Figura 2 Esquema del sistema.

La linealización del espacio de estados del modelo no lineal se lleva a cabo mediante:

$$\dot{x}_L(t) = A_L x_L(t) + B_L [F_c(t)] \quad (7)$$

$$y_L(t) = C_L x_L(t) + D_L [F_c(t)] \quad (8)$$

$$y_t(t) = y_L(t) + w_n \quad (9)$$

Donde w_n representa el ruido del sensor e $y_t(t)$ representa la salida del modelo con las perturbaciones correspondientes.

$$F_c(t) = u_{LQR}(t) + u_a(t) \quad (10)$$

$u_{LQR}(t)$ Representa las señales de control nominales y $u_a(t)$ representa el control adaptativo. La ecuación de estado 7 se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{x}_L(t) = A_m x_L(t) + B_m [\omega_0 u_a(t) + \sigma_1(t)] \quad (11)$$

$A_m = A_L - B_m K_{LQR}^T$ es la matriz del sistema de bucle cerrado, K_{LQR} es la ganancia de retroalimentación de control, $B_m = B_L$ es la matriz de entrada, $\sigma_1(t)$ representa la perturbación y ω_0 es la matriz de ganancia de entrada del sistema, que indica el acoplamiento cruzado entre diferentes entradas.

$$\omega_0(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

El control consta de dos partes diferenciadas. En primer lugar, el control corresponde al controlador gaussiano cuadrático lineal y, en segundo lugar, el control corresponde al control adaptativo.

$$\hat{x}_a(t) = A_m \hat{x}_a(t) + B_m [\omega_0 u_a(t) + \hat{\sigma}_1(t)] \quad (13)$$

Donde $\hat{x}_a(t)$ es el vector de estado estimado de la parte de adaptación, $\hat{y}_a(t)$ es el vector de salida, $B_m = B$ es la matriz de entrada, $\hat{\sigma}_1(t)$ es la perturbación estimada y ω_0 es la matriz de ganancia de entrada del sistema, que indica el acoplamiento cruzado entre diferentes entradas. Una vez que se estiman los estados, la resta se realiza con estados filtrados, lo que da como resultado el error de predicción denotado como $\tilde{x}$.

$$\tilde{x}(t) = \hat{x}_a(t) + x_f \quad (14)$$

La proyección de las perturbaciones se realiza de acuerdo con [10][15][16] de la siguiente manera:

$$\hat{\sigma}_1(t) = Y \text{Proj}(\hat{\sigma}_1(t) - (\tilde{x}^T(t) P_m B_m)^T) \quad (15)$$

Donde el operador $Proj$ de proyección se define como en [17]:

$$\text{Proj}(\theta, y_p) = \begin{cases} y_p, & \text{si } f_p(\theta) < 0 \\ y_p, & \text{si } f_p(\theta) \geq 0 \text{ y } \nabla f_p^T y_p \leq 0 \\ y_p - \nabla f_p A, y_p > f_p(\theta), & \text{si } f_p(\theta) \geq 0 \text{ y } \nabla f_p^T y_p > 0 \end{cases}$$

Dónde

$$\nabla f_p A = \frac{\nabla f_p}{\|\nabla f_p\|} \frac{\nabla f_p}{\|\nabla f_p\|} \quad (15)$$

∇f_p representa el gradiente de la función convexa f_p , que se define como:

$$f_p(\theta) = \frac{(\varepsilon_\theta + 1)\theta^T \theta - \theta_{max}^2}{\varepsilon_\theta \theta_{max}^2} \quad (16)$$

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, γ es la ganancia de adaptación. Tan pronto como se han estimado las perturbaciones, se da un paso preliminar para calcular la variable intermedia $\hat{\eta}(s)$:

$$\hat{\eta}(s) = \omega_0 u_a(s) + \hat{\eta}_1(s) \quad (17)$$

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

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

$$u_a(s) = -(\hat{\eta}(s) - Ref_{ffp}) \quad (18)$$

Dónde

$$Ref_{ffp} = Ref \times K_g \quad (19)$$

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

$$K_g = -(CA_m^{-1}B_m)^{-1} \quad (20)$$

4. Resultados y Discusión

Se han llevado a cabo una serie de simulaciones para estudiar el comportamiento del sistema con el controlador 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 $Ref(t) = [1m, 1m, 1m, 0rad, 0rad, 0rad]^T$. Las matrices de filtros de Kalman se ajustaron usando los siguientes valores:

$$Q = diag([10, 10, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1])$$

$$R = diag([0.001, 0.001, 0.0001, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^{-1}, 10^{-1}])$$

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

$$Q_{LQR} = diag([1.93 \times 10^3, 0.305 \times 10^3, 0.012 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3, 0.005 \times 10^3])$$

$$R_{LQG} = diag([0.0035, 0.0015, 0.0002, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5])$$

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

Tabla 1. Parámetros de ajuste del control adaptativo L1:

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

Se puede ver en la Figura 3.1, 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.

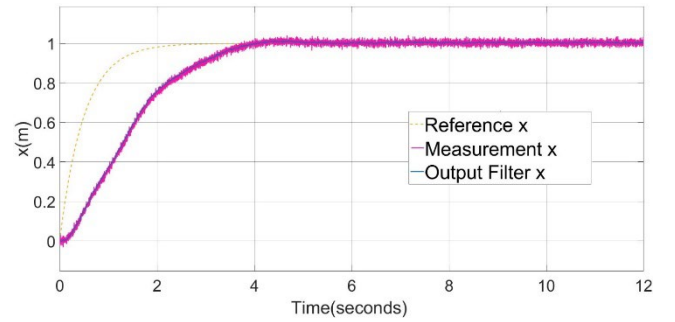


Figura 3 Esquema del sistema. Resultados del ROV con L1 adaptativo; Posición en x.

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 3 que el KF realiza un filtrado aceptable de las señales.

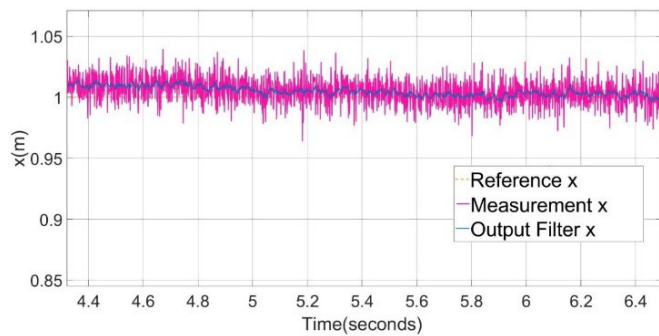


Figura 4 Esquema del sistema. Resultados del ROV con L1 adaptativo; Posición en X con zoom.

Cabe destacar que los vehículos submarinos son movidos por los diferentes propulsores del vehículo. 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 4, 5 y 6 que las señales de control no presentan oscilaciones innecesarias que puedan dañar los propulsores. Además, los esfuerzos de control son pequeños.

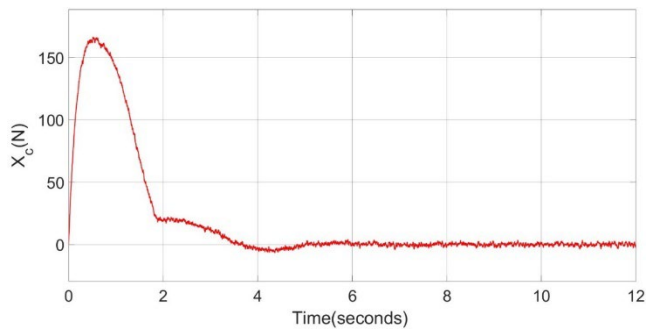


Figura 4 Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control $X_c(N)$ calculada por el controlador

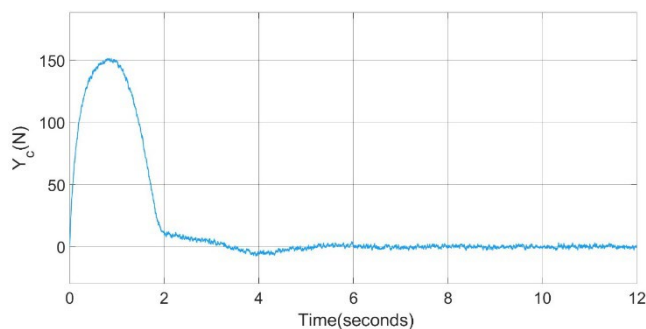


Figura 6 Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control $Y_c(N)$ calculada por el controlador

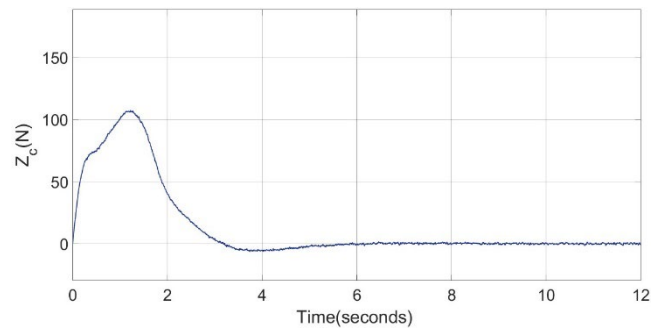


Figura 7 Resultados del ROV con L1 adaptativo; señal de control $Z_c(N)$ calculada por el controlador.

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 la aplicación presentada en este trabajo de un controlador avanzado para el control del 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 previos necesarios para su implementación son conocimientos matemáticos relativo al uso de vectores y matrices. 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 de Matlab-Simulink donde se realiza la implementación matemática y se realizan 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 ver 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 trabajo ha sido realizado 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 el MICIU/ AEI /10.13039/501100011033, por la Unión Europea - Next Generation EU/ PRTR, y a través del proyecto «Control inteligente y colaborativo de vehículos submarinos no tripulados para el posicionamiento dinámico de estructuras marinas flotantes a escala» (ayuda financiada por contrato programa Gob Cantabria-UC).

Referencias

- [1] Schjølberg, I. and Utne, I. B. (2015) Towards autonomy in roV operations 48, 183–188. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315002694>, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.030>. 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles NGCUV.
- [2] 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.
- [3] Sainz Gutierrez, J. J.; Revestido Herrero, E.; Llata García, J. R. and Velasco Gonzalez, F. J. (2022) Aplicación de un Unscented Kalman filter para el filtrado de las señales en un vehículo subacuático teleoperado. XLIII Jornadas de Automatica libro de actas, pp.31-37 <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0031>
- [4] Hosseinnajad, A. and Loueipour, 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
- [5] Chin, C. S. and Lin, W. P. “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.
- [6] Dong, M.; Li, J. and Chou, W. “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
- [7] García-Valdovinos, L.G.; Fonseca-Navarro, F.; Aizpuru-Zinkunegi, J.; Salgado-Jimenez, T.; Gómez-Espinosa, A. and Cruz-Ledesma, J.A. (2019) “Neuro-Sliding Control for Underwater ROV’s Subject to Unknown Disturbances”, Sensors (Basel, Switzerland); 19: 2943.
- [8] Trsljic, P.; Omerdic, E.; Dooly, G. and Toal, D. (2020) “Neuro-Fuzzy’ Dynamic Position Prediction for Autonomous WorkClass ROV Docking”, Sensors (Basel, Switzerland, 20: 693).
- [9] Cao, Y.; Li, B.; Qian, L.; Stokes, A. A.; Ingram, D. M. and Kiprakis, A. (2020) “A Nonlinear Model Predictive Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles With Disturbance Rejection” IEEE access , Vol. 8 p. 158622158634
- [10] Vajpayee, V.; Becerra, V.; Bausch, N.; Deng, J.; Shimjith, S.R. and 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.
- [11] Sainz, J. J.; Becerra, V.; Revestido Herrero, E.; Llata, J. R. and Velasco, F. J. (2023) L1 adaptive control for marine structures. Mathematics (Basel) 11, 3554.
- [12] Fossen, T. (2002) Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics.
- [13] Fossen, T. I. (2011) “Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control”, John Wiley and Sons, Ltd
- [14] von Benzon, M.; Sørensen, F.F.; Uth, E.; Jouffroy, J.; Liniger, J. and Pedersen, S. (2022) An open-source benchmark simulator: Control of a bluerov2 underwater robot. Journal of marine science and engineering 10, 1898.
- [15] Cao, C. and Hovakimyan, N. (2008) Design and analysis of a novel L1 adaptive control architecture with guaranteed transient performance. a IEEE transactions on automatic control 53, 586–591.
- [16] N. Hovakimyan and Cao, C. (2010). L1 adaptive control theory: guaranteed robustness with fast adaptation. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [17] Pomet, J. and Praly, L. (1992) Adaptive nonlinear regulation: estimation from the lyapunov equation. IEEE transactions on automatic control 37, 729–740