

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

II CONVENCION
CIENTIFICA
INTERNACIONAL
2019
UCLV

XVIII SIE

Esquema de guiado para el seguimiento de caminos rectos en vehículos marinos

Guidance scheme for straight path following in marine vehicles

Yunier Valeriano Medina¹, Dizahab Sehuveret Hernández, Luis Hernández Santana¹

1-Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba. yunierv@uclv.edu.cu,
luishs@uclv.edu.cu,

Resumen:

El modelado, simulación, control y guiado son tópicos que actualmente generan continuos desafíos a los que se le debe encontrar solución. En este artículo, se propone un esquema de guiado I-LOS en cascada con un controlador de dirección en modo deslizante para el vehículo sub-actuado HRC-AUV. El desempeño del sistema se comprueba mediante pruebas de simulación, que permiten evaluar el cumplimiento de los requerimientos establecidos, relacionados con el escenario de seguimiento de camino.

Abstract:

The modeling, simulation, control and guidance are topics that currently generate constant challenges to solve. In this paper, a guidance cascade scheme I-LOS with a sliding heading controller for the under-actuated vehicle HRC-AUV is proposed. The performance of the system is corroborated by simulation tests that allow evaluating the fulfillment of the established requirements, related to the path following scenario.

Palabras Clave: Vehículos Autónomos Subacuáticos, Modelado, Guiado, Controlador I-LOS.

Keywords: *Autonomous Underwater Vehicles, Modelling, Guidance, I-LOS Controller.*

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



1. Introducción

El sistema de control de movimiento de los vehículos marinos está compuesto por tres módulos fundamentales: guiado, control y navegación (Cruz, 2012). Diseñar un sistema de esta naturaleza enfrenta a los especialistas al desafío de trabajar con sistemas multivariados, difíciles de modelar por su alto grado de no linealidad y constante interacción con las perturbaciones marinas. Muchos de estos vehículos están equipados con una cantidad insuficiente de actuadores, lo cual complejiza el cumplimiento de las exigentes especificaciones asociadas a los lazos de control.

Los bloques que componen al sistema de control de movimiento se encuentran interconectados entre sí, por lo que resulta muy difícil evaluar el desempeño y la estabilidad total del sistema. Los bloques de guiado y control tienen una alta incidencia en el comportamiento autónomo del vehículo. El guiado determina los valores deseados de posición, velocidad y aceleración para que sean utilizados por el módulo de control. El control se ocupa de determinar las fuerzas y momentos necesarios que deben ser aplicados al vehículo con vistas a satisfacer determinado objetivo de control (Lekkas, 2014).

El seguimiento de camino sin restricciones temporales (*path following* en inglés) constituye un escenario de control de movimiento, donde el objetivo de control es converger y seguir un camino geométrico previamente definido, sin considerar restricción temporal alguna. Los caminos pueden ser rectos o curvos, los conformados sólo por líneas rectas son los más fáciles de seguir.

Cuando el vehículo es sub-actuado (Fossen, 2011), son numerosas las soluciones de guiado y control que se proponen para este tipo de escenario, las cuales abarcan desde el controlador PID (Miskovic, 2011), hasta otras que incluyen complejos algoritmos (Pan, 2013; Wang, 2014). En un número importante de trabajos se emplea la estrategia de

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



guiado conocida como línea de visión (*line of sight*, LOS) (Healy, 2006), combinada en un esquema tipo cascada con un controlador de dirección.

Entre las distintas soluciones de control que se han empleado en vehículos marinos, el control en modo deslizante (SMC) se distingue por actuar directamente sobre las no linealidades del sistema, así como por asegurar robustez ante incertidumbres en los modelos (Zhang, 2013; Song, 2015). Estas características permiten recomendar su utilización, para de conjunto con un algoritmo de guiado, lograr un desempeño favorable durante el seguimiento de caminos sin restricciones temporales.

La estrategia LOS no es capaz de asegurar precisión durante el seguimiento de caminos en presencia de corrientes marinas. Una manera razonable de solucionar parte de estos inconvenientes, consiste en incorporar una acción integral en la ley de guiado. Esta variante, conocida como I-LOS (Borhaug, 2008), también se ha combinado con soluciones de control de dirección en esquemas tipo cascada.

Esta investigación toma como base al vehículo autónomo subacuático HRC-AUV (Martínez, 2013). Las complejidades asociadas a la ausencia de actuadores para controlar el desplazamiento lateral del vehículo, las no linealidades del modelo dinámico, y las afectaciones que provocan perturbaciones como las corrientes marinas, requieren de un esquema de guiado que asegure precisión durante el seguimiento de caminos rectos.

2. Modelo dinámico del vehículo

Cuando se analiza el movimiento de los vehículos marinos en los seis grados de libertad (6 GDL) resulta conveniente definir dos sistemas de coordenadas, tal como se presenta en la Figura 1. El sistema de coordenada móvil se fija en el vehículo y su origen se hace coincidir con el centro de flotabilidad. El sistema de referencia fijo en tierra se considera inercial y con origen en OE.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
 “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
 CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

II CONVENCION
 CIENTIFICA
 INTERNACIONAL
 2019
 UCLV

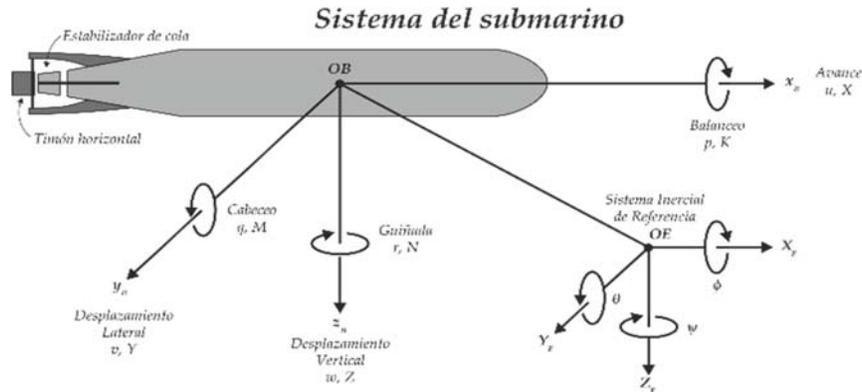


Figura 1. Sistemas de coordenadas empleados en el modelado de vehículos marinos.

Los siguientes vectores describen el movimiento de un vehículo marino en los 6 GDL (Fossen, 2011): $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$, $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ y $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$. En este caso $\boldsymbol{\eta}$ denota el vector de posición y orientación, \mathbf{v} representa al vector de velocidad lineal y angular y $\boldsymbol{\tau}$ se utiliza para representar las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo.

Las ecuaciones cinemáticas se pueden expresar en forma vectorial como:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (1)$$

donde $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ representa la matriz de transformación en función de los ángulos Euler (Fossen, 2011).

Las ecuaciones de movimiento para un vehículo marino se pueden expresar como:

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{olas} \quad (2)$$

donde $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$ es la matriz de inercia, $\mathbf{C}(\mathbf{v}_r) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)$ es la matriz de Coriolis, $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$ agrupa los términos de amortiguamiento, $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ es el vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad, por último, $\boldsymbol{\tau}$ es el vector de fuerzas y momentos de control.

A la ecuación (2) se le incorporan los términos relativos al oleaje ($\boldsymbol{\tau}_{olas}$) y a las corrientes marinas (\mathbf{v}_r). El espectro JONSWAP se emplea para representar las olas generadas por

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



el viento en aquellas zonas marinas donde el área del mar es limitada y la profundidad se considera finita (Fossen, 2011). A continuación, se presenta una función de transferencia de segundo orden para representar los efectos del oleaje, que puede ser incluida en los lazos de control.

$$y(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\zeta w_0 s + w_0^2} \quad (3)$$

La ganancia se define como $K_w = 2\zeta w_0 \zeta_w$ siendo ζ_w una constante que describe la intensidad de las olas, ζ es el coeficiente de amortiguamiento, cuyo valor es de 0.1 para el espectro JONSWAP, y w_0 es la frecuencia fundamental de las olas.

La velocidad relativa se define respecto al sistema de referencia OB como $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} + \mathbf{v}_c$, siendo \mathbf{v}_c la velocidad de las corrientes marinas. Las componentes de \mathbf{v}_c en el plano horizontal se calculan como:

$$u_c = V_{ca} \cos(\beta_c - \psi), \quad v_c = V_{ca} \sin(\beta_c - \psi) \quad (4)$$

con V_{ca} como magnitud de las corrientes y β_c como el ángulo que denota la dirección lateral de las mismas respecto al movimiento de la embarcación.

El modelo expresado mediante la ecuación (2) es el que se utiliza para la simulación. En (Valeriano, 2013) se presentan los valores numéricos de los parámetros que forman parte del mismo y que han sido determinados a partir de los datos geométricos e inerciales del vehículo, así como resultado de pruebas experimentales.

3. Control de dirección en modo deslizante

La ecuación (2) no resulta útil para el diseño de controladores desacoplados. Una solución consiste en dividir el sistema en varios subsistemas con poca interacción entre ellos. Los tres subsistemas son: subsistema de velocidad, subsistema lateral y subsistema longitudinal.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



La dinámica del vehículo para el subsistema lateral se puede describir como:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_5}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (5)$$

donde $N_{\dot{r}}$ es el término correspondiente a las masas añadidas, N_r es el coeficiente lineal de amortiguamiento y b_5 la ganancia del timón de cola del HRC-AUV en el subsistema lateral. Este modelo es el que se emplea para el diseño del controlador de dirección en modo deslizante.

El SMC se diseña con el objetivo de controlar la dirección (ψ) del vehículo. La representación dinámica de ψ del HRC-AUV se corresponde con la de un sistema de segundo orden: $\ddot{\psi} = \hat{b}(\psi, t)[\hat{f}(\psi, t) + U(t) + d(t)]$. A partir de esta estructura, es posible plantear que:

$$\hat{b}(\psi, t) = \frac{b_5}{I_{zz}-N_{\dot{r}}}, \quad \hat{f}(\psi, t) = \frac{N_r}{b_5} r \quad (6)$$

El término $d(t)$ representa a la perturbación, la cual no se tiene en cuenta en este diseño. Por su parte, $U(t)$ es la ley de control que es necesario ajustar.

Las componentes de error del sistema se establecen como: $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ y $\tilde{\dot{\psi}} = \dot{r} - r$. Por su parte, la superficie deslizante se corresponde con una recta de pendiente λ , que se define como:

$$h(t) = \tilde{\dot{\psi}} + \lambda \tilde{\psi} \quad (7)$$

Cuando $h(t) = 0$, el sistema alcanza la dinámica deseada. La señal de mando está dada por:

$$U = \frac{I_{zz}-N_{\dot{r}}}{b_5 I_{zz}-N_{\dot{r}}} \left[\ddot{\psi}_d + \frac{N_r}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} \dot{\psi} + \lambda \tilde{\dot{\psi}} + K_s \text{sign}(h) \right] \quad (8)$$

donde K_s representa a la ganancia de robustez y constituye un parámetro de ajuste del controlador (Valeriano, 2016).

Para evitar los efectos adversos que provoca el *chattering* (Prieto, 2015), se establece una continuidad en la vecindad de $h(t)$, acotada en el intervalo de $[-\Phi \Phi]$. El término discontinuo *sign* se reemplaza por una función de saturación (Fossen, 2011). Con ello, se busca sustituir el término $K_S \text{sign}(h)$ en la ecuación (8) por $K_S \text{sat}(\frac{h}{\Phi})$ cuando el sistema llegue a la vecindad de $h(t)$.

4. Controlador I-LOS

La ley de guiado basada en la distancia *lookahead* se utiliza con el propósito de conducir al vehículo hacia el camino en dirección al vector LOS (Borhaug, 2008). El vector LOS se orienta desde la embarcación hasta un punto situado en una línea tangencial a la ruta deseada, a una distancia *lookahead* ($\Delta > 0$) de la proyección de la posición del vehículo sobre el camino (Lekkas, 2014), tal como se aprecia en la Figura 2.

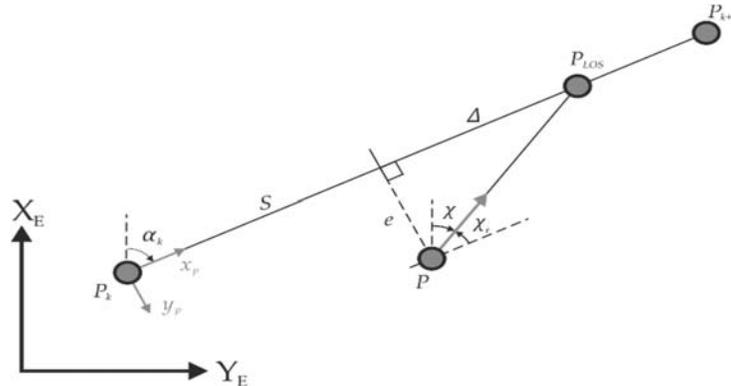


Figura 2. Guiado LOS para el seguimiento de caminos rectos.

El eje x del camino ha sido rotado un ángulo positivo y constante $\alpha_k = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k)$ relativo al eje x de OE. Las expresiones del error de seguimiento a lo largo del camino $s(t)$ y del error de seguimiento perpendicular al camino $e(t)$ quedan planteadas como:

$$s(t) = (x_t - x_k) \cos \alpha_k + (y_t - y_k) \sin \alpha_k \quad (9)$$

$$e(t) = -(x_t - x_k) \sin \alpha_k + (y_t - y_k) \cos \alpha_k \quad (10)$$

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Esta ley propone determinar el ángulo de curso del vehículo como la suma de dos ángulos:

$$\chi = \chi_r(e) + \chi_p \quad (11)$$

donde $\chi_r(e)$ es un ángulo de corrección, el cual asegura que la velocidad del vehículo esté en dirección al punto de la ruta hacia el cual la embarcación se dirige, y $\chi_p = \alpha_K$.

Los objetivos de control en el escenario de seguimiento de caminos son:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = \psi_d \quad (12)$$

En presencia de corrientes marinas, se produce una diferencia entre ψ y χ . El ángulo de rumbo deseado debe ser entonces calculado como:

$$\psi_d = \chi + \beta_r \quad (13)$$

donde β_r se conoce como ángulo de deslizamiento lateral.

Cuando se utiliza ley de guiado I-LOS, se considera a $\beta_r \approx 0$ y se modifica el algoritmo de guiado basado en la distancia *lookahead*, quedando expresado de la siguiente manera (Borhaug, 2008):

$$\psi_d = \alpha_k - \arctan\left(\frac{e + \sigma y_{int}}{\Delta}\right) \quad (14)$$

$$\dot{y}_{int} = \left(\frac{\Delta e}{(e + \sigma y_{int})^2 + \Delta^2}\right) \quad (15)$$

donde $\sigma > 0$ y Δ son los parámetros de diseño. En el caso de Δ su valor depende de la longitud del vehículo.

El criterio para que el vehículo cambie de dirección hacia el siguiente punto queda definido por: $s_{k+1} - s(t) \leq R_{k+1}$, donde R_{k+1} es el valor del radio del círculo de aceptación.

5. Resultados de las simulaciones

En la Figura 3 se presenta el esquema de sistema de control de movimiento que se propone para desarrollar maniobras con el vehículo HRC-AUV asociadas al escenario de seguimiento de caminos.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

II CONVENCION
CIENTIFICA
INTERNACIONAL
2019
UCLV

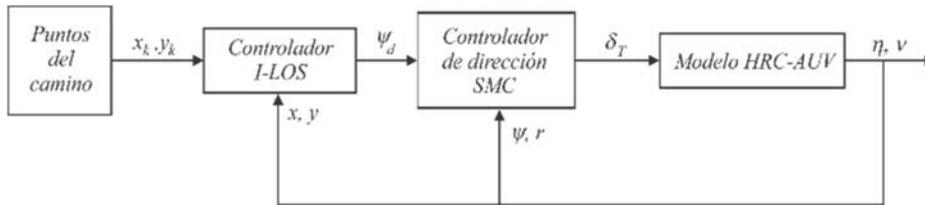


Figura 3. Diagrama de bloques del esquema de guiado.

El objetivo es lograr que el vehículo siga un camino recto formado por los puntos $p_1 = (0, 100)$ y $p_2 = (4000, 0)$. Los datos de la simulación son: $n = 500 \text{ rpm}$, $V_{ca} = 0.2 \text{ m/s}$ y $\beta_c = 60^\circ$, no se considera oleaje y el radio del círculo de aceptación para considerar a un punto como vencido es de $R = 20 \text{ m}$. Los valores del controlador I-LOS son: $\sigma = 0.1 \text{ m/s}$ y $\Delta = 40 \text{ m}$, mientras que los relacionados con el SMC son: $\lambda = 0.5 \text{ s}^{-1}$ y $K_S = 2000$.

En la Figura 4 se presenta el resultado conseguido durante la maniobra, donde se aprecia cómo el vehículo logra una convergencia suave al camino.

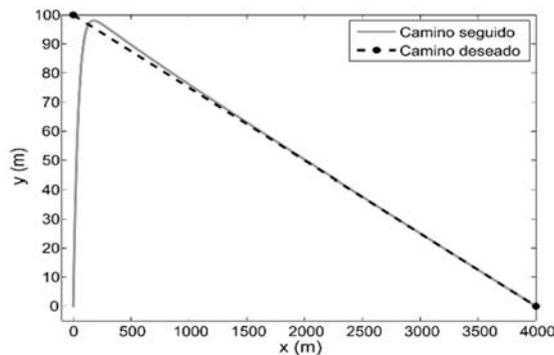


Figura 4. Seguimiento del camino.

Por su parte, en la Figura 5, se presenta el comportamiento del error perpendicular al camino. Inicialmente el error es de -100 m , pero la acción de control generada por la cascada logra estabilizarlo en cero, con lo cual se cumple con uno de los objetivos de control.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL "II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

II CONVENCION
CIENTIFICA
INTERNACIONAL
2019
UCLV

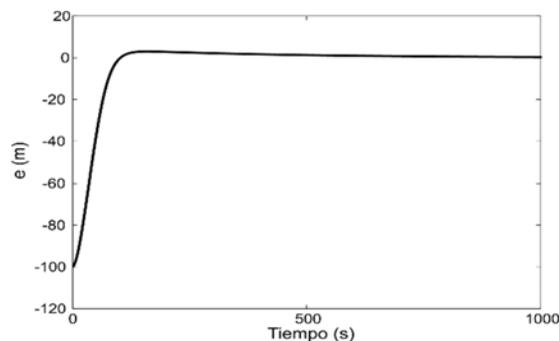


Figura 5. Error perpendicular al camino.

El controlador de dirección en modo deslizante sigue idealmente la referencia proporcionada por el algoritmo de guiado, tal como se aprecia en la Figura 6, a pesar de las incertidumbres y no linealidades que caracterizan a la dinámica del vehículo.

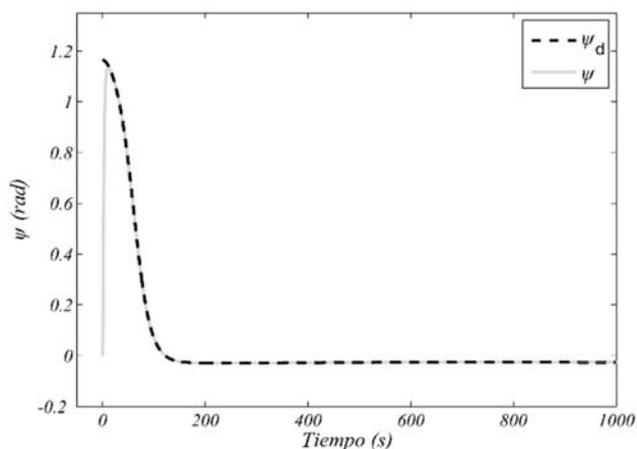


Figura 6. Ángulo de rumbo.

6. Conclusiones

La estructura en cascada permite que el controlador I-LOS reduzca el error de seguimiento y determine las referencias necesarias que son seguidas por el controlador de dirección en modo deslizante, sin provocar afectaciones en el comportamiento dinámico del vehículo durante el desarrollo de misiones relacionadas con el escenario de seguimiento de caminos, a pesar de la presencia de las corrientes marinas, las complejidades dinámicas y las incertidumbres del modelo.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



7. Referencias bibliográficas

1. Cruz, J. M., Aranda, J., Girón, J. M. (2012) Tutorial automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Rev Iberoam Autom In* 9: pp. 205–208.
2. Lekkas, A. (2014) Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. PhD, NTNU, Noruega.
3. Fossen, T. I. (2011) *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Jhon Wiley & Sons, Nueva York.
4. Miskovic, N., Triska, Z., Nad, D et al (2011) Guidance of a small-scale overactuated marine platform-experimental results, *Proceedings of the 34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*. Croacia, 2011, pp 684–689.
5. Pan, C. Z., Lai, X. Z., Yang, S. X. et. al. (2013) An efficient neural network approach to tracking control of an autonomous surface vehicle with unknown dynamics. *Expert Syst. Appl.* 40: pp. 1629–1635.
6. Wang, H., Wang, D., Peng, Z. (2014) Neural network based adaptive dynamic surface control for cooperative path following of marine surface vehicles via state and output feedback. *Neurocomputing* 133: pp. 170–178.
7. Healy, A. J. (2006) Advances in unmanned marine vehicles, vol. 69, Peter Peregrinus LTD, Gran Bretaña. *Cap. Guidance Laws, Obstacle Avoidance, Artificial Potential Functions*, 2006, pp. 43–66.
8. Zhang, F., Tan, X. (2013) Gliding robotic fish and its tail-enabled yaw motion stabilization using sliding mode control, *ASME Dynamic Systems and Control Conference*. Estados Unidos, 2013, pp. V002T32A006–V002T32A006.
9. Song, Y. S., Arshad, M. R. (2015) Sliding mode depth control of a hovering autonomous underwater vehicle, *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. Malasia, 2015, pp. 435–440.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



10. Borhaug, E., Pavlov, A., Pettersen, K. Y. (2008) Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents, *47th IEEE Conference on Decision and Control*. México, 2008, pp. 4984–4991.
11. Martínez, A., Rodríguez, Y., Hernández, L., *et. al.* (2013) Arquitectura de hardware y software para AUV, resultados experimentales. *Rev. Iberoam. Autom. In.* 10: pp. 333–343.
12. Valeriano, Y., Martínez, A., Hernández, L. *et. al.* (2013) Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Math. Comp. Model. Dyn.* 19: pp. 175–200.
13. Valeriano, Y., Fernández, A., Hernández, L. *et. al.* (2016) Yaw controller in sliding mode for underwater autonomous vehicle. *IEEE Lat. Am. T.* 14: pp. 1213–1220.
14. Prieto, P. J., Cazares, N. R., García, D. *et. al.* (2015) Estabilidad para un control borroso en modo deslizante aplicado a un robot paralelo neumático. *Rev. Iberoam. Autom. In.* 12: pp. 488–496.