

Navegación fluvial autónoma asistida por visión aérea

Leonardo Garberoglio¹, Patricio Moreno², Ignacio Mas^{4,5}, and Juan I. Giribet^{2,3,4}

¹Grupo de Estudio de Sistemas de Control, Universidad Tecnológica Nacional - FRSN, San Nicolás, Argentina

²GPSIC - Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina

³Instituto Argentino de Matemática “Alberto Calderón” (IAM)

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁵Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina

Resumen—Este trabajo presenta una formación compuesta por un vehículo de superficie autónomo (ASV, por sus siglas en inglés) y un vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) con el objetivo de navegar, de forma autónoma, un cauce de agua. La coordinación entre ambos vehículos se logra mediante la técnica de control *Cluster Space*. El UAV brinda una visión aumentada del entorno por medio de una cámara RGB. Para el guiado del ASV se utiliza una técnica basada en campos potenciales artificiales que se generan de tiempo de ejecución utilizando la información provista por el UAV. La técnica propuesta se valida mediante simulaciones usando el entorno ROS-Gazebo.

Keywords—Robótica móvil, Vehículo aéreo no tripulado, vehículo autónomo de superficie, Cluster-Space Control.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio y la preservación del medio ambiente es una actividad que ha tomado gran importancia en los últimos años. En particular las aplicaciones fluviales han tenido un gran desarrollo gracias a la aparición de pequeños vehículos autónomos de superficie (ASV por sus siglas en inglés). Los avances en los sistemas de propulsión han permitido la proliferación de estos vehículos, en particular gracias al desarrollo de pequeños pero potentes motores eléctricos (particularmente motores sin escobillas), en el incremento en la densidad de energía almacenada en las baterías de ion de litio, y la miniaturización de los sensores. Aunque los vehículos pequeños pueden llevar sólo unos pocos sensores, son más económicos y más simples de diseñar, construir y desplegar, lo que los convierte en una plataforma interesante, especialmente para operaciones en aguas poco profundas [1, 2, 3].

El monitoreo de cuencas fluviales es una de las tareas más exigentes debido a la necesidad de evaluar simultáneamente la biodiversidad y los niveles de contaminación, tanto en el agua como en la costa. Por otra parte, estos entornos son generalmente amplios y muchas veces de difícil acceso para el estudio de campo con personas. Diversas técnicas se han utilizado para mitigar estos problemas. En [4] se realizó un estudio del estado del arte de la tecnología en el campo del monitoreo marino utilizando redes de sensores inalámbricos. En [5] se analizó el uso de imágenes satelitales para la detección de derrames

de petróleo. Si bien estas técnicas logran resolver algunas aplicaciones, poseen ciertas restricciones. En muchos casos la implementación de una red de sensores es costosa. Por su parte, el análisis de imágenes satelitales suele arrojar resultados desactualizados y no permiten realizar análisis del agua *in situ*. Si bien estas tareas pueden ser realizadas por pequeños ASV [6, 7], el reducido campo de visión sobre la superficie ofrecido por estos vehículos dificulta un análisis adecuado del campo lejano, por ejemplo las costas y obstáculos distantes. Esto afecta negativamente las capacidades de navegación segura del sistema. Contar con una perspectiva aérea del lugar puede ayudar a la navegación del ASV. En [8] se utilizaron imágenes previamente adquiridas para generar un mapa de obstáculos para ser utilizado posteriormente por el vehículo acuático. Otra vez, el principal limitante es la posible desactualización de los datos adquiridos.

La colaboración entre un vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés) y un ASV han probado gran eficiencia en diversas tareas, en particular monitoreo medioambiental, como ser la caracterización de costas altamente dinámicas [9, 10], mitigación de derrames de petróleo [11], mapeo de alta resolución [9, 2], entre otros.

En [12] el UAV es utilizado como un sensor adicional, proporcionando información al ASV. Debido a las restricciones de peso, la computadora de navegación del ASV tiene más potencia computacional que la embebida del UAV. Por este motivo toda la información se envía al ASV y el vehículo marino ejecuta el algoritmo de guía. Sin embargo, en algunos escenarios, se debe adoptar una estrategia más reactiva.

Este trabajo propone un método para navegar un ASV por cauces de agua basado en imágenes aéreas captadas por un UAV. A partir de las imágenes se crean funciones potenciales virtuales que guían la formación por el cauce. Adicionalmente, se controla el campo de visión de la cámara para mantener la información necesaria para la navegación dentro de la imagen.

La organización del trabajo continúa con la sección II, donde se describen las estrategias de control y los algoritmos desarrollados. Las secciones III y IV describen la implementación del sistema simulado y los resultados de las validaciones realizadas por computadora.

Email address: lgarberoglio@frsn.utn.edu.ar

II. NAVEGACIÓN FLUVIAL AUTÓNOMA

El propósito principal es evaluar un sistema autónomo que pueda ser utilizado como plataforma de actividades científicas tales como monitoreo de calidad de agua o inspección de costas marinas, entre otras. En este sentido es deseable contar con un vehículo acuático, autónomo, que tenga la capacidad de navegar por entornos desconocidos, portando el instrumental necesario para la tarea a desarrollar. Por otra parte, se considera de gran ayuda el uso de un segundo vehículo, aéreo, también autónomo, el cuál sirva de soporte en el armado del mapa del entorno o guiado del ASV, gracias a la posibilidad que este posee de tener un campo de visión mucho más amplio.

Si bien Pinto et al. [12] realizan una tarea similar, el UAV y el ASV se controlan por separado. En dicho trabajo, ambos vehículos siguen una serie de puntos predefinidos (*waypoints*) y, en el caso del ASV, utiliza la información recogida para hacer evasión de obstáculos y llegar a los *waypoints*.

II-A. Formulación en el espacio del cluster

Este método permite la selección de un conjunto de variables de estado independientes del sistema adecuadas para la especificación, el control y la supervisión adaptadas al problema a resolver. Estas variables de estado forman el espacio de cluster del sistema. Las variables de estado del espacio de cluster pueden estar relacionadas con variables de estado específicas del robot, variables de estado del actuador, etc. a través de un conjunto formal de transformaciones cinemáticas. Estas transformaciones permiten que los comandos del cluster se conviertan en comandos específicos del robot, y que los datos de estado específicos del robot detectados se conviertan en datos de estado del espacio del cluster. Como resultado, un operador o piloto en tiempo real puede especificar y monitorear el movimiento del sistema desde la perspectiva del cluster. Dicha interacción mejora la usabilidad al ofrecer un nivel de abstracción de control por encima de los robots y de los actuadores [13, 14, 15, 16].

II-B. Definición del Cluster

La figura 1 muestra los marcos de referencia relevantes para la formación UAV-ASV y los parámetros en el espacio del cluster seleccionados. Hemos elegido ubicar el marco de referencia del cluster $\{C\}$ coincidente con la posición y orientación del ASV. En base a esto, las siete variables de estado correspondientes a la pose de un ASV con 3 grados de libertad (DOF por sus siglas en inglés) y la pose de un UAV con 4 DOF, $\vec{r} = (x_{ASV}, y_{ASV}, \theta_{ASV}, x_{UAV}, y_{UAV}, z_{UAV}, \theta_{UAV})^T$, son mapeadas en las siete variables de estado en espacio del cluster $\vec{c} = (x_c, y_c, \theta_c, s_c, la_c, of_c, \gamma_c)^T$, donde (x_c, y_c, θ_c) definen el marco de referencia del cluster, el *swath* o franja de la imagen es definida por s_c , la distancia hacia adelante/atrás entre el ASV y el UAV es definida por la_c , distancia lateral entre los vehículos es definida por of_c , y la orientación del UAV es definida por γ_c .

Las relaciones cinemáticas entre las variables del cluster y de los robots se pueden expresar como $\vec{c} = FWD_KIN(\vec{r})$ y $\vec{r} = INV_KIN(\vec{c})$. A partir de dichas ecuaciones pueden

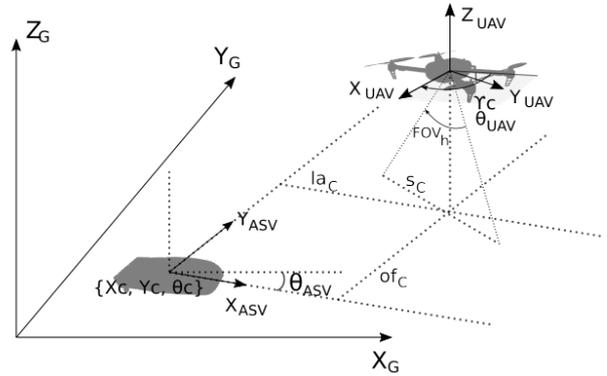


Figura 1: Variables de estado en el espacio del cluster.

obtenerse las matrices jacobianas, que permiten relacionar las velocidades en ambos espacios según $\dot{\vec{c}} = \mathbf{J}(\vec{r})\dot{\vec{r}}$ y $\dot{\vec{r}} = \mathbf{J}^{-1}(\vec{r})\dot{\vec{c}}$. Para mayor detalles ver [17].

II-C. Guiado del ASV por el cauce de agua

La técnica de campos de potenciales virtuales, o artificiales, es una técnica simple utilizada en guiado y planificación de trayectorias para cualquier tipo de vehículo. En general, esta técnica es utilizada para movimientos en dos dimensiones, donde se tiene un punto objetivo que se desea alcanzar y obstáculos, móviles o no, que deben ser evitados [18]. Dadas las coordenadas de estos puntos, se construye una función de energía potencial con un mínimo, local o global, en el objetivo y máximos o picos en los obstáculos. Utilizando esta función, el vehículo se mueve hacia una configuración de menor energía. Para lograr este desplazamiento, se minimiza la energía del robot utilizando el gradiente negativo de la función potencial. A diferencia de métodos como el implementado en [19], donde utilizan el Sistema de Información Automática (AIS, por sus siglas en inglés) para formar un campo de potencial artificial (APF) y guiar un barco hacia un muelle en forma segura, aquí se propone formar el APF a partir de las imágenes del UAV. El uso de APF puede conducir a la aparición de mínimos locales en posiciones diferentes al objetivo [20]. El presente trabajo no contempla la resolución de esas situaciones.

El campo potencial es una función $U : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ compuesta por la suma de dos funciones independientes. Una de ellas, $U_{att}(q)$, es un potencial que genera fuerzas atractivas hacia el objetivo, en tanto la otra, $U_{rep}(q)$, genera fuerzas repulsivas a partir de los obstáculos.

II-C1. Potencial atractivo: El potencial atractivo, generalmente, se construye como una función cuadrática, cónica o una combinación de ambas, con un mínimo en las coordenadas objetivo $q_g \in \mathbb{R}^n$:

$$U_{\text{att}}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_a d(q, q_g)^2, & d(q, q_g) \leq \rho \\ k_b d(q, q_g), & \text{otro caso,} \end{cases}$$

$$F_{\text{att}}(q) = \begin{cases} k_a(q - q_g), & d(q, q_g) \leq \rho \\ \frac{k_b}{d(q, q_g)}(q - q_g), & \text{otro caso,} \end{cases}$$

donde $d(q, q_g)$ es la distancia entre un punto q del espacio y q_g , $\rho \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ es la distancia donde cambia la forma del potencial, y $k_a, k_b \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ son constantes de ajuste.

II-C2. Potencial repulsivo: En el caso de los potenciales y fuerzas repulsivas, las mismas se forman de acuerdo a la siguiente función:

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \infty, & d(q, q_o) \leq 0 \\ \frac{k_r}{2} \left(\frac{1}{d(q, q_o)} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & 0 < d(q, q_o) \leq d_0 \\ 0, & d_0 < d(q, q_o), \end{cases}$$

$$F_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} k_r \left(\frac{1}{d(q, q_o)} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{(q - q_o)}{d^2(q, q_o)}, & 0 < d(q, q_o) \leq d_0 \\ 0, & \text{otro caso.} \end{cases}$$

II-C3. Potencial total: Finalmente, el potencial total se compone de ambos potenciales, sumando un potencial repulsivo por cada obstáculo:

$$U(q) = U_{\text{att}} + \sum_{\forall \text{ obstáculo}} U_{\text{rep}}(q)$$

$$F(q) = -\nabla U(q).$$

Estas funciones se muestran en la Fig. 2.

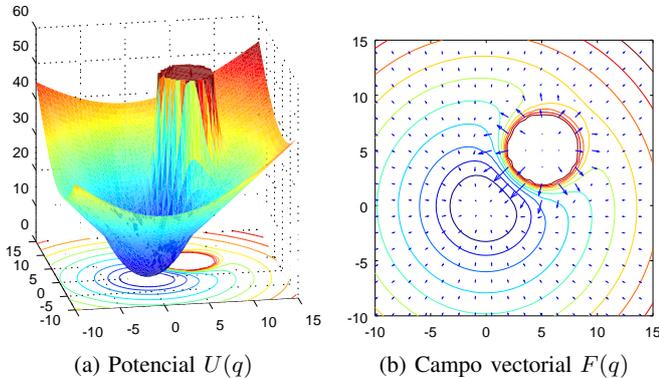
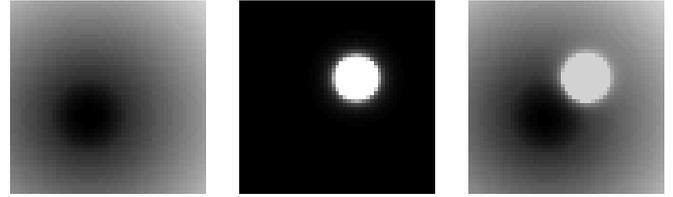


Figura 2: Composición de funciones potenciales y sus campos vectoriales.

II-D. Campo potencial a partir una imagen

La Fig. 3 es una representación bidimensional en escala de grises del potencial presentado en la Fig. 2. A partir de ésta, surge la idea de realizar un proceso inverso para obtener el campo potencial utilizando una imagen tomada por la cámara montada en el UAV. Para obtener el potencial y el gradiente, la imagen tomada por la cámara debe ser procesada, realizando los siguientes pasos:

1. Preprocesar la imagen:



(a) Atractivo (b) Repulsivo (c) Total

Figura 3: Campos potenciales como imágenes en tonos grises

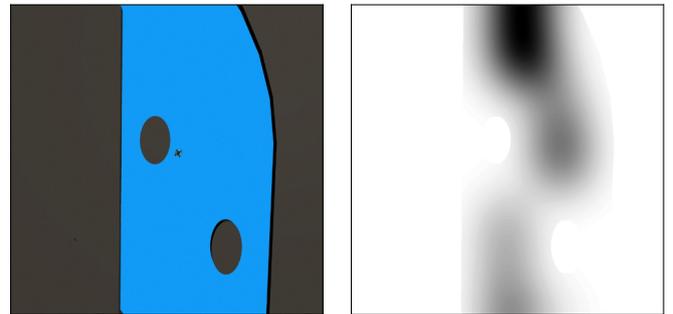
- a) Convertir la imagen de RGB a escala de grises
- b) Suavizar contornos y disminuir el ruido

2. Binarización

3. Suavizado (generación del difuminado de los bordes): obtención del potencial

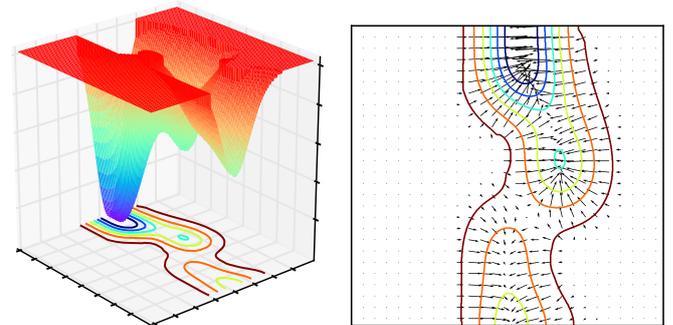
4. Cálculo del gradiente de la imagen: obtención de las fuerzas ficticias provenientes del entorno.

Siguiendo los pasos dichos para la imagen de la Fig. 4a, se obtiene el potencial que se muestra en Fig. 4c y el campo vectorial de fuerzas repulsivas que se muestra en la Fig. 4d.



(a) Captura de la cámara

(b) Potencial en escala de grises



(c) Potencial generado

(d) Campo vectorial

Figura 4: Obtención del campo potencial a partir de una foto

II-E. Control de swath y orientación

Con el objetivo de conseguir mayor autonomía se implementaron dos generadores de referencia automáticos para los parámetros γ_c y s_c , correspondientes a la orientación de la formación y el *swath* respectivamente. El objetivo del primero es conseguir que la formación navegue en forma longitudinal respecto a la orientación del río. El segundo objetivo busca

conseguir una relación fija entre el ancho total de la imagen y el ancho del cauce de agua. Tanto la orientación como el ancho del cauce son estimadas utilizando la información provista por la cámara a bordo del UAV. La Fig. 5 muestra el resultado de dicha estimación en un cuadro de la cámara.

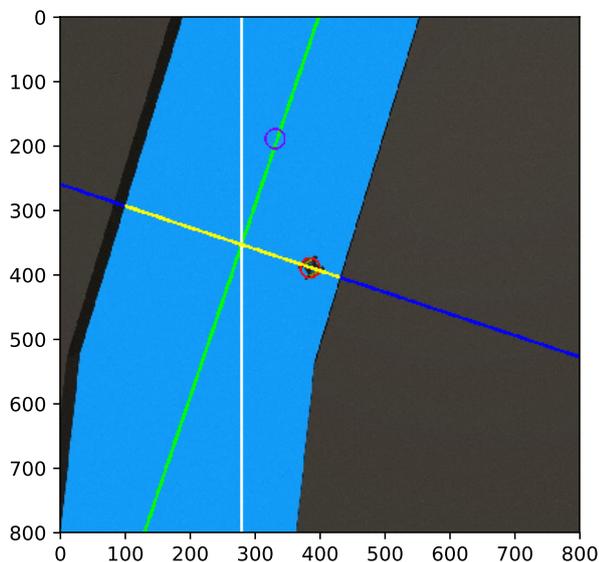


Figura 5: Estimación del ancho y la orientación del cauce.

La recta verde corresponde a la orientación del cauce de agua, que se obtiene al encontrar la orientación del rectángulo de menor área que circunscribe al río en la imagen. El círculo rojo pertenece a la estimación de la posición del ASV, que se obtiene de aplicar el algoritmo descrito en [21, 22]. El círculo violeta muestra la ubicación del potencial atractor, que se define a una distancia fija del ASV sobre la recta verde. Existen diversos modos de calcular el ancho del cauce, el método elegido corresponde a la distancia entre costas (segmento amarillo) intersecadas por la recta perpendicular a la orientación del cauce (recta azul) y que pasa por la posición estimada del ASV en la imagen. La recta blanca indica la orientación de la cámara (γ_c) que se busca que esté alineada con la recta verde de orientación del cauce.

III. ENTORNO DE SIMULACIÓN

Estos algoritmos fueron probados en un entorno de simulación. El mismo funciona en una PC de escritorio, corriendo Ubuntu 16.04, con 8 GB de memoria RAM y un procesador Intel core i7. La simulación corre en el Sistema Operativo Robótico (ROS)—Kinetic—y el entorno Gazebo 7.0. El UAV fue modelado utilizando un *plugin* para Gazebo escrito por el Autonomous System Lab of ETH Zürich University [23] para el quadrotor IRIS de 3D-Robotics y el firmware de PX4. La comunicación con el modelo fue realizada a través de la interface MAVROS. Se utilizó un *plugin* de una cámara RGB de 800×800 píxeles para obtener las imágenes desde el UAV, con un campo de visión de 80° . El modelo del terreno fue generado con una herramienta desarrollada por Clear Path Robotics. El modelo del ASV, de la misma empresa, consiste

en un bote de comando diferencial con 2 motores sumergidos en cada pontón. La lógica de control en el espacio del cluster fue programada como nodos de ROS utilizando el lenguaje python.

IV. RESULTADOS

Con el objetivo de validar nuestra propuesta se realizó una simulación utilizando las herramientas previamente descritas. El mapa generado presenta un cauce de río con diferentes curvas, distancia entre costas variable y algunas islas a modo de obstáculos.

La Fig. 6 muestra el recorrido completo de la formación sobre el cauce del río, mientras que la Fig. 7 muestra una ampliación en 3D de la sección donde varía el ancho del río y se encuentran los obstáculos.

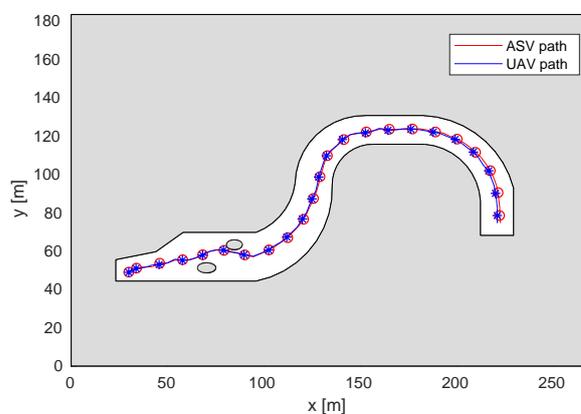


Figura 6: Vista superior del camino seguido por la formación.

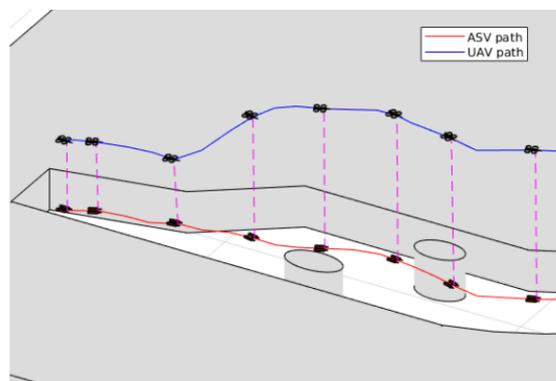
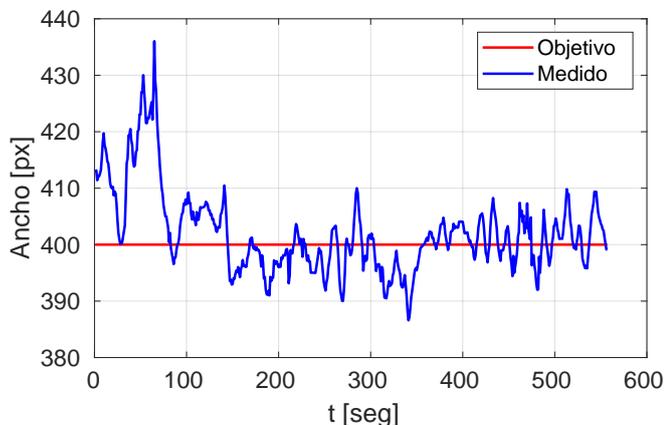


Figura 7: Ampliación del recorrido completo de la formación.

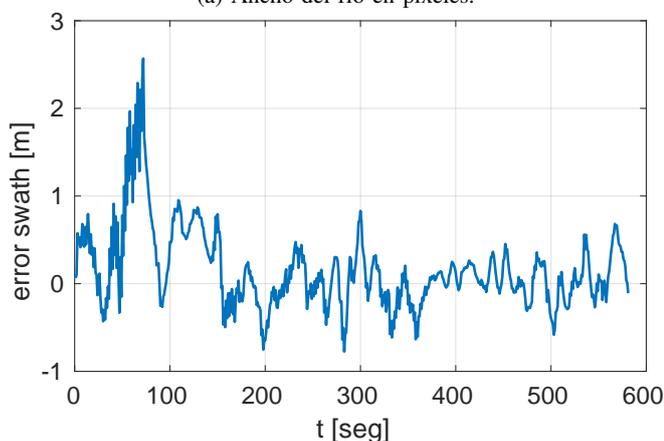
Como puede observarse, la formación se mantiene durante todo el experimento, consiguiendo evadir los obstáculos presentes y seguir el cauce del río de forma autónoma.

El siguiente punto analizado es el sistema de control de *swath*. El objetivo es conseguir una relación constante de 1 a 1 entre el ancho del río en el punto donde se encuentra el ASV, y la cantidad de costa a ser visualizada por la cámara del UAV, medidos en píxeles. Esto es, mantener el ancho del río en 400 píxeles. Como resultado del procesamiento de la imagen

se generan referencias para el parámetro *swath* del cluster. La figura Fig. 8 muestra el ancho estimado, en píxeles, del río durante el experimento y el seguimiento de dicho parámetro por parte del controlador del cluster.



(a) Ancho del río en píxeles.



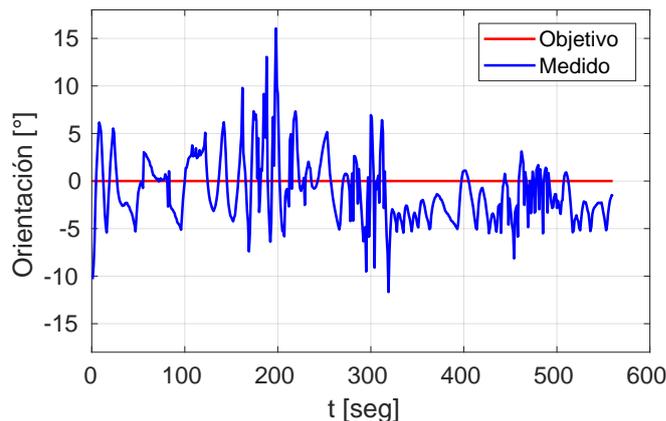
(b) Error en swath.

Figura 8: Control de swath.

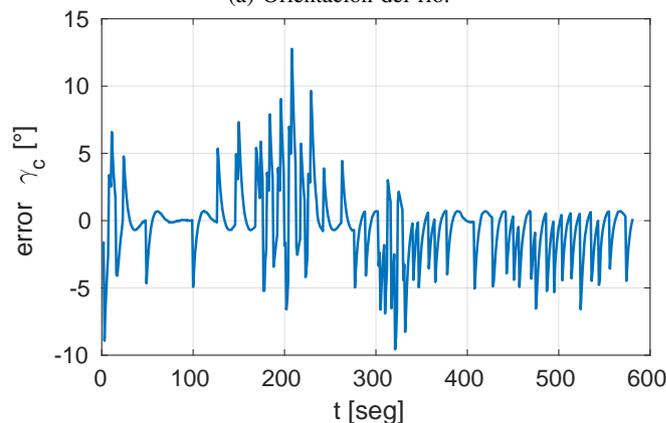
Finalmente se analiza el control de la orientación γ_c de la formación. En este caso, el objetivo es mantener dicha orientación alineada con la orientación del cauce de agua. Para ello, en función de la orientación estimada del cauce se generan referencias para el parámetro γ_c . La Fig. 9 muestra la orientación del río durante el experimento y el desempeño del controlador del cluster de dicho parámetro.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una formación entre un vehículo aéreo y uno acuático con capacidad para navegar un cauce de agua de manera autónoma. La formación utiliza la técnica *cluster space control* por medio de la cual se pueden especificar parámetros que facilitan el control de la misma. La navegación autónoma se consigue por medio del uso de los potenciales virtuales calculados a partir de la información provista por la cámara del UAV, detectando costas y obstáculos. Además, mediante los parámetros de la formación se controla el campo de visión para asegurar la detección de las costas.



(a) Orientación del río.



(b) Error en γ_c .

Figura 9: Control de Orientación.

Los potenciales que definen la navegación pueden ser también obtenidos fusionando información provista por distintos sensores. Como trabajo futuro se puede mencionar la incorporación de información de profundidad (batimetría) a dichos potenciales y la validación experimental con vehículos reales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los subsidios AMUTISN-0005369TC de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, ITBACyT DT13/2018 y FONCYT PICT 2016-2016, de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina.

REFERENCIAS

- [1] Peter Kimball, John Bailey, Sarah Das, Rocky Geyer, Trevor Harrison, Clay Kunz, Kevin Manganini, Ken Mankoff, Katie Samuelson, Thomas Sayre-McCord, et al. The whoi jetyak: An autonomous surface vehicle for oceanographic research in shallow or dangerous waters. In *2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, pages 1–7. IEEE, 2014.
- [2] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet. Autonomous vehicles for outdoor multidomain mapping. In *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina*

- (ARGENCON), pages 1–8, June 2018. doi: 10.1109/ARGENCON.2018.8646054.
- [3] Gerardo G. Acosta, Bruno Menna, Roberto de La Vega, Luis Arrien, Hugo Curti, Sebastian Villar, Roberto Leegstra, Mariano De Paula, Ignacio Carlucho, Franco Solari, and Alejandro Rozenfeld. Macabot: prototipo de vehiculo autonomo de superficie (asv). In *XI Jornadas Argentinas de Robotica*, Nov. 2017.
- [4] G. Xu, W. Shen, and X. Wang. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey. *Sensors*, 14(9):16932–16954, 2014.
- [5] Camilla Brekke and Anne HS Solberg. Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote sensing of environment*, 95(1):1–13, 2005.
- [6] Matthew Dunbabin, Alistair Grinham, and James Udy. An autonomous surface vehicle for water quality monitoring. In *Australasian conference on robotics and automation (ACRA)*, pages 2–4. Citeseer, 2009.
- [7] Massimo Caccia, Riccardo Bono, Gabriele Bruzzone, E Spirandelli, G Veruggio, AM Stortini, and G Capodaglio. Sampling sea surfaces with sesamo: an autonomous craft for the study of sea-air interactions. *IEEE robotics & automation magazine*, 12(3):95–105, 2005.
- [8] Hordur K Heidarsson and Gaurav S Sukhatme. Obstacle detection from overhead imagery using self-supervised learning for autonomous surface vehicles. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3160–3165. IEEE, 2011.
- [9] A. Mancini, E. Frontoni, P. Zingaretti, and S. Longhi. High-resolution mapping of river and estuary areas by using unmanned aerial and surface platforms. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 534–542, June 2015. doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152333.
- [10] T. Marques, K. Lima, M. Ribeiro, A. S. Ferreira, J. B. Sousa, and R. Mendes. Characterization of highly dynamic coastal environments, employing teams of heterogeneous vehicles: A holistic case study. In *2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*, pages 1–8, May 2018. doi: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559107.
- [11] D. Pedrosa, A. Dias, A. Martins, J. Almeida, and E. Silva. Control-law for oil spill mitigation with an autonomous surface vehicle. In *2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*, pages 1–6, May 2018.
- [12] Eduardo Pinto, Francisco Marques, Ricardo Mendonça, André Lourenço, Pedro Santana, and José Barata. An autonomous surface-aerial marsupial robotic team for riverine environmental monitoring: Benefiting from coordinated aerial, underwater, and surface level perception. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, pages 443–450. IEEE, 2014.
- [13] T. Adamek, C. A. Kitts, and I. Mas. Gradient-based cluster space navigation for autonomous surface vessels. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2):506–518, April 2015. ISSN 1083-4435. doi: 10.1109/TMECH.2013.2297152.
- [14] I. Mas and C. Kitts. Cooperative tasks using teams of mobile robots. In Haeng Kon Kim, Sio-Long Ao, Mahyar A. Amouzegar, and Burghard B. Rieger, editors, *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, volume 247 of *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pages 83–99. Springer Netherlands, 2014. ISBN 978-94-007-6817-8. doi: 10.1007/978-94-007-6818-5_7. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6818-5_7.
- [15] I. Mas and C. Kitts. Object manipulation using cooperative mobile multi-robot systems. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science 2012, WCECS 2012*, pages 324–329, October 2012. ISSN 2078-0958.
- [16] P. Mahacek, C.A. Kitts, and I. Mas. Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 17(1):65–75, Feb 2012. ISSN 1083-4435. doi: 10.1109/TMECH.2011.2174376.
- [17] Garberoglio Leonardo, Moreno Patricio, Ignacio Mas, and Juan I. Giribet. Coordinated asv-uav control for marine collision-free navigation. In *2019 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [18] Oussama Khatib. *Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots*, pages 396–404. Springer New York, New York, NY, 1990. ISBN 978-1-4613-8997-2. doi: 10.1007/978-1-4613-8997-2_29. URL https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8997-2_29.
- [19] W. Chao, M. Feng, W. Qing, and W. Shuwu. A situation awareness approach for usv based on artificial potential fields. In *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, pages 232–235, Aug 2017. doi: 10.1109/ICTIS.2017.8047770.
- [20] Y. Koren and J. Borenstein. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1398–1404 vol.2, April 1991. doi: 10.1109/ROBOT.1991.131810.
- [21] I. Mas, S. Curi, C. Kitts, and J.I. Giribet. Visual target-tracking using a formation of unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. ASME, 2015.
- [22] J. I. Giribet, I. Mas, and P. Moreno. Vision-based integrated navigation system and optimal allocation in formation flying. In *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 52–61, June 2018. doi: 10.1109/ICUAS.2018.8453429.
- [23] Fadri Furrer, Michael Burri, Markus Achtelik, and Roland Siegwart. *RotorS – A Modular Gazebo MAV Simulator Framework*, volume 625, pages 595–625. Springer, Cham, 01 2016. ISBN 978-3-319-26054-9. doi: 10.1007/978-3-319-26054-9_23.