

Control coordinado de vehículos aéreos y acuáticos para relevamiento batimétrico en aguas poco profundas

Coordinated control of aerial and aquatic vehicles for bathymetric survey in shallow waters

Leonardo Garberoglio*^{†1}, Patricio Moreno*^{‡§2}, Ignacio Mas*^{‡3} and Juan Giribet*^{‡4}

*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 Godoy Cruz 2290, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

[†]Centro de Investigación y Transferencia, Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional
 Colón 332, San Nicolás, Argentina

¹lgarberoglio@frsn.utn.edu.ar

[‡]Departamento de Ingeniería - Universidad de San Andrés
 Vito Dumas 284, Buenos Aires, Argentina

²morenop@udesa.edu.ar

³imas@udesa.edu.ar

⁴jgiribet@conicet.gov.ar

Recibido: 11/10/22; Aceptado: 24/11/22

Resumen—Las aplicaciones con pequeños vehículos no tripulados han crecido notablemente en los últimos años. Junto a ello, el interés y la necesidad de realizar tareas utilizando varios de estos vehículos fue cobrando relevancia.

En este trabajo se presenta el uso de una formación basada en la técnica de control en el espacio del cluster entre un vehículo no tripulado de superficie y uno aéreo, con el objetivo de realizar monitoreo de cuencas fluviales. La diferente percepción del entorno que cada vehículo posee y la capacidad de transportar diferentes sensores son características fundamentales para este tipo de aplicación. Se presentan resultados tanto en entorno de simulación como en una aplicación real con vehículos no tripulados pertenecientes a los grupos de investigación.

Palabras clave: Control en el espacio del Cluster; Robótica Móvil; Vehículo Autónomo Aéreo; Vehículo autónomo de superficie.

Abstract— Applications with small unmanned vehicles have grown remarkably in recent years. Along with this, the interest and the need to carry out tasks using several of these vehicles has gained relevance.

This paper presents the use of a formation based on the cluster space control technique between an unmanned surface vehicle and an aerial vehicle, with the aim of monitoring river basins. The different perception of the environment that each vehicle has and the ability to transport different sensors are fundamental characteristics for this type of application. Results are presented both in a simulation environment and in a real application with unmanned vehicles belonging to the research groups.

Keywords: Cluster Space Control; Mobile Robotics; Unmanned Aerial Vehicle; Autonomous Surface Vessel.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y utilización de vehículos no tripulados ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años. La miniaturización de los sensores (unidades de mediciones inerciales, sistemas de posicionamiento global, lidars, etc.),

actuadores (motores sin escobilla) y los avances en las baterías (Iones de Litio, Grafeno, etc.) han permitido el diseño y puesta en marcha de pequeños vehículos no tripulados.

Los vehículos autónomos de superficie (ASV) han sido utilizados en diversas aplicaciones, como ser la toma de muestras de agua [1], contención de derrames de petróleo [2] y vigilancia [3], entre otras. Si bien estos pequeños vehículos pueden llevar un reducido número de sensores, son más simples de diseñar, construir y poner en marcha, haciéndolos una plataforma interesante, principalmente para aplicaciones en aguas poco profundas [4], [5], y [6]. De igual modo, el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha crecido en la misma dirección. Estos vehículos tienen capacidades muy diferentes a los anteriores. Poseen un campo de visión mucho más amplio y una mayor maniobrabilidad, sin embargo pueden operar por un tiempo limitado (del orden de algunas decenas de minutos) y su capacidad de carga es más acotada.

El trabajo coordinado entre uno o varios UAV con ASV ha mostrado ser muy eficiente para distintas tareas como, por ejemplo, el monitoreo medioambiental, la caracterización de costas [7], [8], la mitigación de derrames de petróleo [9] y la construcción de mapas de alta resolución [5], [7]. En [10] se utilizó un UAV junto a un ASV con el objetivo de brindar una respuesta automática a un siniestro marino. El UAV fue dotado de una cámara de alta resolución con la que se obtienen las imágenes utilizadas tanto para la detección de víctimas como para la ubicación del ASV. El guiado del ASV hacia las víctimas fue realizado haciendo uso de algoritmos de *Visual Tracking*.

En sistemas compuestos por múltiples robots, es muy importante elegir de forma acorde la técnica utilizada para coordinar el movimiento individual de cada vehículo. Se han desarrollado una gran variedad de técnicas en este campo basadas en teoría de control, robótica y biología,

siendo aplicables en desarrollos tanto en tierra, agua, aire y el espacio. Una técnica usual, denominada líder-seguidor, consiste en definir un grupo de robots seguidores, los cuales controlan su posición en relación con un líder [11], [12], [13]. De esta manera es necesario comandar solamente la trayectoria del líder, y el resto de la formación lo seguirá. Una extensión de esta técnica son las cadenas líder-seguidor, en las cuales los robots seguidores controlan su posición en relación a uno o más líderes locales que, a su vez, siguen a otros líderes locales en una red que, en última instancia, está dirigida por un líder designado [14]. Se ha demostrado el uso de flotas de remolcadores automatizados y técnicas de navegación en enjambre para mover otros barcos [15] o el uso de formaciones de ASV para la detección de fenómenos como la proliferación de algas nocivas [16]. Muchas de estas soluciones han sido implementadas con robots que operan en un mismo entorno, o dominio, como son el agua, el aire, o la tierra. Sin embargo, trabajar con sistemas compuestos por vehículos que operan en diferentes dominios—sistemas multidominio—permite aumentar las capacidades del mismo aprovechando la sinergia entre los vehículos, lo que además brinda mayor flexibilidad al sistema. El ASV posee mayor capacidad de carga, pudiéndose utilizar como plataforma de despegue/aterriza/carga de baterías para solventar la principal deficiencia de los UAV, el reducido tiempo de vuelo. Por otra parte la percepción del entorno por parte del ASV es limitada, pudiéndose complementar con la posibilidad del UAV de tener una visión más general del entorno de trabajo, ya sea utilizando cámaras o LIDARS. Sin embargo, la estrategia de control debe tener en cuenta las limitaciones y la dinámica de cada vehículo. El enfoque de espacio de cluster [17] es un método de control de formación que promueve la especificación y el monitoreo del movimiento de un sistema móvil compuesto por múltiples robots. La estrategia conceptualiza el sistema de n -robots como una sola entidad, un *cluster*, y los movimientos deseados se especifican en función de los atributos del grupo, como la posición, la orientación y la geometría.

La organización del trabajo continúa con la sección II en la que se describe una propuesta de monitoreo medioambiental haciendo uso de una formación de vehículos no tripulados. A continuación, la sección III, introduce la forma de obtener mapas batimétricos. Luego en la sección IV, se muestra el diseño y fabricación del vehículo propuesto. La sección V expone el sistema de adquisición de datos. Finalmente en la sección VI se muestran resultados de la formación propuesta, tanto en simulación como utilizando los vehículos reales. Finalmente se expone la puesta en marcha del sistema de mapeo, obteniendo la batimetría de una zona del arroyo *Las Hermanas* en la localidad de Ramallo.

II. MONITOREO AMBIENTAL MULTIROBOT

Realizar el monitoreo de una cuenca fluvial es una tarea compleja ya que es necesario evaluar tanto la biodiversidad como los niveles de contaminación en el agua y en la costa. Estos entornos suelen ser grandes y en general con acceso restringido para las personas. Estas tareas suelen ser realizadas por medio de pequeños ASV [18], [19]. Sin embargo estos vehículos presentan un campo de visión

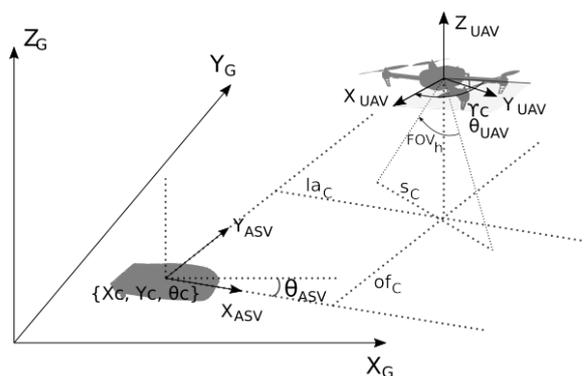


Figura 1: Marcos de referencia y variables de estados del Cluster.

reducido sobre la superficie del agua. Para realizar una navegación segura sería conveniente contar con una vista aérea de la zona de trabajo.

Para enfrentar estos desafíos, se propone realizar una formación entre un ASV y un UAV, con la capacidad de tomar muestras en forma coordinada. El control de la formación es realizada utilizando la técnica de *Cluster Space Control*. Con esta técnica es posible seleccionar un grupo de variables de estado acordes para la descripción, el control y la supervisión de la formación propuesta. Por medio de transformaciones cinemáticas es posible transformar las variables de estado en el espacio del cluster en variables de estado en el espacio de cada robot. Haciendo uso de dichas transformaciones es posible convertir los comandos del cluster a comandos que puedan ejecutar cada uno de los robots. De igual modo, los estados de cada uno de los vehículos pueden ser transformados a estados específicos del cluster. Gracias a esto, un piloto o un sistema de control autónomo, puede monitorear y modificar el movimiento de la formación como si fuese un cluster de vehículos. [20]–[22].

II-A. Definición del Cluster

En la Figura 1 se puede observar los marcos de referencia utilizados para definir la formación UAV-ASV así como también los parámetros en el espacio del cluster.

El marco de referencia del cluster $\{C\}$ ha sido ubicado de modo tal que coincida su posición y orientación con la del ASV. Teniendo en cuenta esto, las variables de estado correspondientes a la pose del ASV con tres grados de libertad (DOF por sus siglas en inglés) y la pose del UAV con cuatro DOF,

$$\vec{r} = (x_{ASV}, y_{ASV}, \theta_{ASV}, x_{UAV}, y_{UAV}, z_{UAV}, \theta_{UAV})^T$$

son transformadas en las variables de estado en el espacio del cluster

$$\vec{c} = (x_c, y_c, \theta_c, s_c, l_{a_c}, o_{f_c}, \gamma_c)^T$$

donde (x_c, y_c, θ_c) definen el marco de referencia del cluster, el *swath* o ancho de la imagen es definida por s_c , la distancia hacia adelante/atrás entre los vehículos esta dada por l_{a_c} , la distancia lateral entre el ASV y el UAV es definida por o_{f_c} , y la orientación del UAV esta dada por γ_c .

Las relaciones cinemáticas entre las variables del cluster y de los robots se pueden expresar como:

$$x_c = x_{ASV}$$

$$y_c = y_{ASV}$$

$$\theta_c = \theta_{ASV}$$

$$s_c = 2z_{UAV} \tan\left(\frac{FOV_h}{2}\right)$$

$$l_{a_c} = \cos(\theta_{UAV})\Delta_x + \sin(\theta_{UAV})\Delta_y$$

$$o_{f_c} = -\sin(\theta_{UAV})\Delta_x + \cos(\theta_{UAV})\Delta_y$$

$$\gamma_c = \theta_{UAV}$$

con: $\Delta_x = x_{UAV} - x_{ASV}$ y $\Delta_y = y_{UAV} - y_{ASV}$, y FOV_h es el campo de visión horizontal de la cámara a bordo del UAV.

Las ecuaciones de la cinemática inversa permiten transformar las variables de estado en el espacio del cluster en variables de estado en el espacio de los robots:

$$x_{ASV} = x_c$$

$$y_{ASV} = y_c$$

$$\theta_{ASV} = \theta_c$$

$$x_{UAV} = x_c + l_{a_c} \cos(\gamma_c) - o_{f_c} \sin(\gamma_c)$$

$$y_{UAV} = y_c + l_{a_c} \sin(\gamma_c) + o_{f_c} \cos(\gamma_c)$$

$$z_{UAV} = \frac{s_c}{2 \tan\left(\frac{FOV_h}{2}\right)}$$

$$\theta_{UAV} = \gamma_c$$

Derivando las ecuaciones de la cinemática directa e inversa, se pueden obtener fácilmente las correspondientes matrices Jacobianas, con las que se puede relacionar las velocidades en el espacio del cluster con las mismas en el espacio de los robots.

Para mayor detalle ver [23].

II-B. Definición de la formación

En este trabajo se ha decidido utilizar una versión reducida del cluster previamente presentado. Con el objetivo de utilizar un sistema de guiado externo para el ASV se redujeron los grados de libertad de la formación. En este caso el sistema de control del cluster no actuará sobre el ASV, quien será comandado por otro sistema que controla y monitorea la misión a realizar. Es necesario, por lo tanto, realizar las siguientes modificaciones en las entradas al sistema de control del cluster $ref_{x_c} = x_c, ref_{y_c} = y_c, ref_{\theta_c} = \theta_c$, donde $ref_{x_c}, ref_{y_c}, ref_{\theta_c}$ son los valores deseados de la posición y orientación del cluster. En la Figura 2 puede observarse el esquema del sistema de control de la formación presentada.

Introduciendo estos cambio se da al *cluster* un formato similar al de una formación tipo líder-seguidor, en donde el ASV es propuesto como líder y el UAV lo sigue manteniendo los parámetros establecidos para el sistema de control.

III. BATIMETRÍA EN AGUAS POCO PROFUNDAS

En los últimos años han habido grandes avances en la tecnología de sonar, la capacidad de posicionamiento global

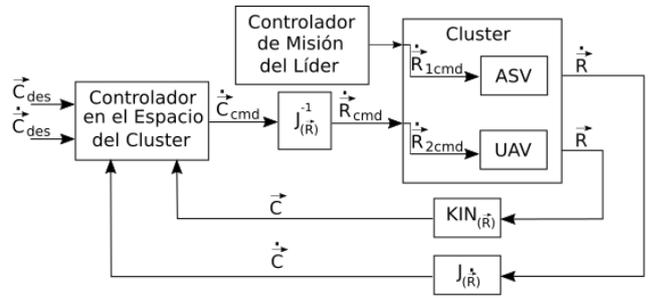


Figura 2: Esquema del sistema de control de la formación propuesto.

y el poder de procesamiento de las computadoras que han revolucionado el mapeo y la exploración del fondo marino.

Aunque la batimetría es utilizada hoy en día para medir las profundidades de los océanos y mares, también hay muchas aplicaciones en aguas poco profundas como ser lagos, represas, ríos y arroyos. Un ejemplo típico puede ser el mapeo de fondo de plantas hidroeléctricas, cuya infraestructura necesita ser monitoreada periódicamente. Es de gran importancia conocer el volumen total disponible y la distribución de la profundidad de la cuenca, particularmente cerca de la compuerta de descarga de la represa. Otra aplicación similar es el relevamiento del fondo en lagos artificiales creados en plantas industriales para el tratamiento de aguas residuales. En todos estos casos el uso de una embarcación tripulada, por más pequeña que sea, no resulta adecuado, ya sea por el costo operativo, por el difícil acceso que suelen tener dichos reservorios o por la imposibilidad operativa cuando la profundidad del agua en la que se debe trabajar es muy baja. Esta última situación se ha visto en numerosas oportunidades, un ejemplo reciente es la actual bajante histórica del río Paraná.

En [24] se desarrolló un ASV (Vehículo autónomo de Superficie) con el objetivo de realizar batimetría de forma autónoma. En [25] se ha utilizado un vehículo comercial, el Kingfisher de la empresa ClearPath Robotics [26], en el cual se ha montado una costosa ecosonda multihaz junto a una cámara monocular con el objeto de obtener un mosaico 3D de alta resolución del fondo marino. En el ámbito local, el grupo de investigación CIFICEN de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y el CONICET, desde hace varios años viene trabajando en el desarrollo de su ASV denominado MACABOT [6], [27] y recientemente ha publicado un software para el análisis de señales de ecosondas [28], no solo con funcionalidades para la detección del fondo sino también para la detección de cardúmenes, muy útil para la pesca. El Instituto de Automática de la Universidad de San Juan y CONICET también está desarrollando un ASV basado en una estructura comercial tipo kayak para la inspección de diques.

En nuestro grupo de investigación se ha construido un ASV utilizando impresión 3D, con el objetivo de realizar un mapa batimétrico en cauces de aguas calmas. Para ello se ha dotado al vehículo de una ecosonda de simple haz. Dado que este tipo de sensores realizan mediciones en un solo punto y aprovechando la alta tasa de datos provista, se propone utilizar un dispositivo capaz de rotar al sensor

en un movimiento de vaivén con el fin de obtener un barrido similar al producido por un sensor de tipo multihaz. Particularmente, se construye sobre el trabajo realizado anteriormente por los autores [5] con el objetivo de obtener un vehículo de superficie no tripulado que opere en forma autónoma.

Los sistemas autónomos para realizar estudios hidrográficos son relativamente nuevos, siendo el primero de este tipo de estudios realizado en Reino Unido en 2017 [29]. En dicho trabajo se utilizaron un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y un ASV. El primero se utilizó para recopilar datos de alta resolución cerca de la costa, generando un mapa topográfico por sobre el nivel del mar, mientras que el ASV se utilizó aguas adentro, generando un modelo batimétrico digital. De este modo es posible utilizar la información del UAV para fijar la línea costera y delimitar el área de trabajo del ASV. Considerando este tipo de actividades, resulta interesante estudiar la planificación de la ruta del ASV, en tiempo real, a partir de las imágenes tomadas por un vehículo aéreo cooperando con el ASV [23], [30], [31]. En este trabajo se presenta el sistema multirrobótico autónomo de monitoreo de cauces hidrográficos, compuesto por un UAV y ASV, cuya coordinación permite aprovechar la sinergia entre ambos vehículos para realizar relevamientos autónomos en forma segura y con alta resolución.

IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ASV

Partiendo de la experiencia previa en el diseño y puesta en marcha del ASV *Yaguaron* [5] se procedió al desarrollo de un nuevo vehículo. Este nuevo diseño tuvo como objetivos principales obtener un vehículo de muy bajo costo, con dimensiones reducidas para facilitar su transporte y colocación en el agua, de fácil construcción y reproducción en caso de requerir vehículos adicionales. Se optó por un diseño tipo catamarán con dos pontones debido a su estabilidad, facilidad de manejo en modo diferencial y capacidad de carga. Para el modelado del vehículo se utilizó un software de CAD/CAM. En la figura 3 puede observarse el diseño preliminar del ASV. Este software permite obtener los modelos en formato *STL*. La manufactura de los pontones se realizó utilizando tecnología de impresión 3D. Las distintas partes fueron impresas utilizando filamento de ABS. Luego del montaje de los anclajes necesarios para los motores de propulsión y la estructura de unión de los pontones, se procedió a la unión de las diversas piezas. Finalmente la impermeabilización y rigidez de las estructuras fue obtenida por medio de varias capas de fibra de vidrio y resina de poliéster. En la figura 4 puede observarse parte de este proceso.

La propulsión del ASV se realiza por medio de dos *thrusters brushless*, modelo BT-100 de la empresa *BlueRobotics*, estos aportan un empuje máximo de 50 N con lo que se obtiene una velocidad máxima de 2 m/s. Dichos motores son manejados por *Controladores Electrónicos de Velocidad* o *ESC* por sus siglas en inglés. La fuente de energía del vehículo proviene de dos baterías de *polímero de iones de litio* de 14,8 V y 5 Ah cada una, conectadas en paralelo. A velocidad crucero, el ASV consume 5 A, por lo que es posible realizar misiones de alrededor de dos horas de duración. En la figura 5 puede verse el vehículo terminado.

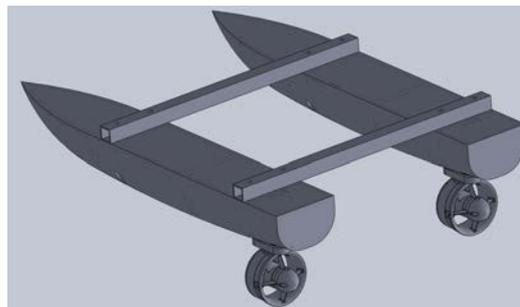
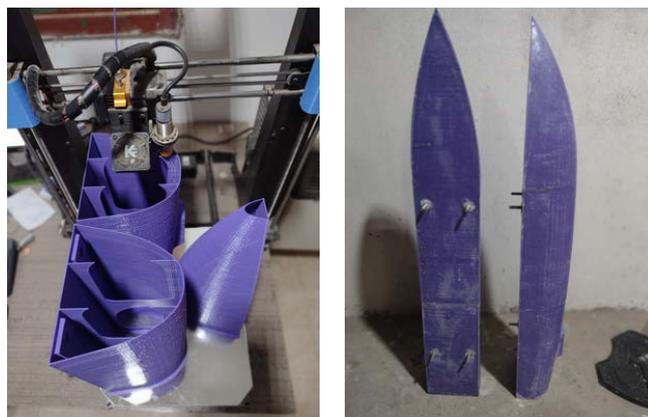


Figura 3: Modelo del ASV en software CAD/CAM.



(a) Impresión 3D

(b) Pontones terminados

Figura 4: Manufactura de los pontones con impresión 3D y fibra de vidrio.

V. SISTEMA DE MEDICIÓN

Para realizar un mapa batimétrico es necesario contar con un sistema de adquisición de datos con el cual se pueda obtener mediciones de profundidad de agua y geolocalizar de forma precisa dichas mediciones. Para lo primero se ha utilizado una ecosonda simple haz de la firma EchoLogger, en particular el modelo ECT400 [32]. Este sensor funciona con una frecuencia acústica de 450 KHz, un ancho de haz de 5°, permite realizar mediciones de entre 0,15 m y 100 m y posee una tasa máxima de mediciones de 10 Hz. Con el objetivo de tomar lecturas en distintos puntos, aprovechando la tasa de mediciones del sensor, se ha diseñado un sistema de vaivén en el cual se ha montado el sensor. Este dispositivo permite rotar la ecosonda un determinado ángulo respecto de la vertical. Dicho movimiento se realiza por medio de un *Servo Inteligente*, en este caso se optó por el modelo DRS0101 de la firma Herkulex. Este servo posee comunicación serial *full-duplex* por medio de la cual es posible configurar la referencia de posición deseada y leer la posición real del servo en cada instante. De este modo es posible conocer, de forma precisa, la inclinación del sensor al momento de realizar una medición. En la figura 6 se muestra el dispositivo que permite el movimiento de vaivén de la ecosonda.

Para la geolocalización de las mediciones se ha utilizado el sistema de GPS con correcciones RTK, para ello se utilizaron módulos desarrollados por la empresa ArduSimple [33], basados en el receptor uBlox F9P. Para obtener la orientación del vehículo se ha utilizado un segundo receptor



Figura 5: Vehículo terminado.

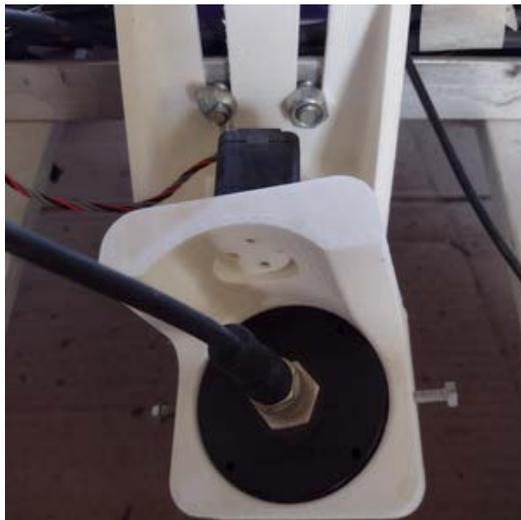


Figura 6: Sistema de vaivén para la ecosonda.

GPS configurado en la modalidad *Base Móvil*. En esta configuración ambos receptores son instalados en el vehículo, con las antenas a una distancia mayor de 0,4 m. La base móvil envía mensajes de corrección al receptor denominado *rover* quien puede calcular la posición relativa Norte, Este, Abajo entre ellos y por lo tanto obtener, de forma precisa, la orientación respecto del Norte geográfico. Si además se agrega al sistema un receptor configurado como Base Fija, el cual envía mensajes de corrección de posición es posible obtener la localización del vehículo con precisión del orden del centímetro.

Un punto importante para conseguir precisión en la obtención del mapa batimétrico es la sincronización de los datos de los diversos sensores que forman parte del sistema. En esta aplicación, es necesario sincronizar el dato de posición y orientación entregado por el GPS con el dato de posición angular del servo inteligente y con el dato de profundidad entregado por la ecosonda. Los tres sensores mencionados se comunican con la computadora de bajo nivel *Choriboard* [34], [35] por medio de puertos serie asincrónicos. Debido a que la ecosonda posee una entrada de disparo externo, la cual permite solicitar una medición al sensor y teniendo en cuenta que la posición del servo inteligente es posible consultarla en cualquier momento con un simple comando, se eligió al GPS como sensor principal para la sincronización de los mensajes. De este modo cada vez que una

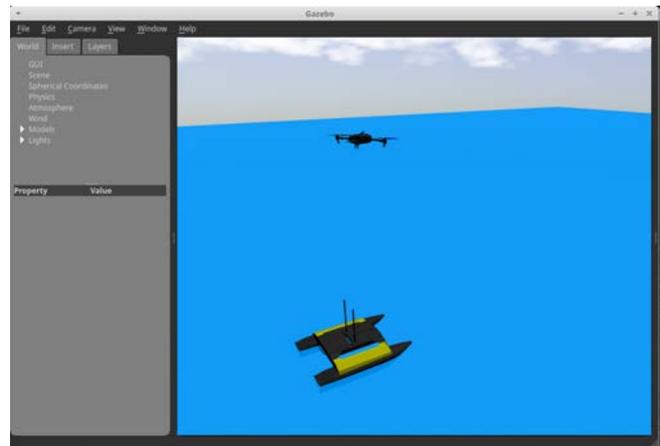


Figura 7: Modelos del UAV y ASV en Gazebo.

nueva solución de posición es decodificada se realiza una solicitud de interrupción por software, IRQ por sus siglas en inglés. En la rutina de atención de la interrupción, ISR por sus siglas en inglés, se envía un disparo externo solicitando una medición de profundidad a la ecosonda. Acto seguido se obtiene la posición angular actual del servo inteligente. Toda esta información es enviada a una computadora de alto nivel para su procesamiento y visualización. De este modo el usuario puede supervisar en tiempo real los puntos del mapa que se están adquiriendo. Dicha información puede ser utilizada, también, por un nodo encargado del guiado del vehículo para, en caso de detectarse un nivel de agua muy bajo para la navegación, realizar las correspondientes maniobras de evasión.

Para evaluar el sistema de recolección de datos batimétricos se realizaron una serie de ensayos en una pileta en la cual se sumergieron objetos con dimensiones conocidas para validar las mediciones obtenidas con el ASV y la ecosonda, los primeros resultados de estas pruebas fueron presentados en [36].

VI. RESULTADOS

Con el objetivo de validar la formación propuesta se realizaron pruebas en un entorno de simulación y luego utilizando los vehículos reales.

VI-A. Entorno de Simulación

En una primer instancia, los algoritmos propuestos fueron evaluados en un entorno de simulación, compuesto por el Sistema Operativo Robótico (ROS) y el motor de física e interfaz gráfica Gazebo. El modelo del UAV utilizado, en forma de *plugin* para Gazebo, fue el desarrollado por el Autonomous System Lab of ETH Zürich University [37], el cual representa al quadrotor IRIS de la empresa 3D-Robotics y el firmware de PX4. Dicho firmware hace uso de la *interface* MAVROS para comunicarse con ROS. Para el modelo del ASV y del terreno se utilizaron herramientas de la firma learPath Robotics [26], en particular el correspondiente al *Heron ASV*. El control en el espacio del cluster fue programada en el lenguaje Python como nodos de ROS.

En la Figura 7 se puede observar una vista del entorno de simulación con los vehículos.

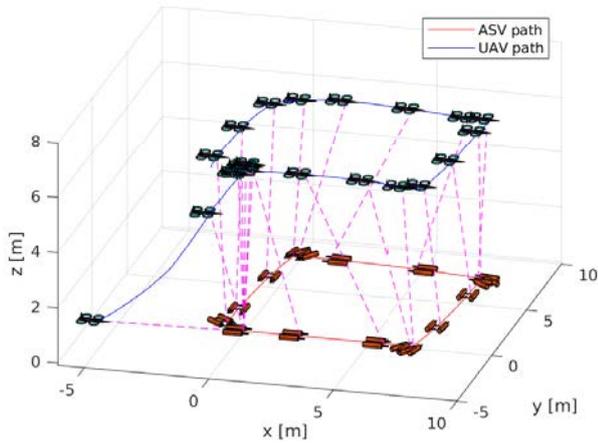


Figura 8: Primera simulación $s_c = 6\text{ m}$, $of_c = 0\text{ m}$, $la_c = 0\text{ m}$, $\gamma_c = 0^\circ$.

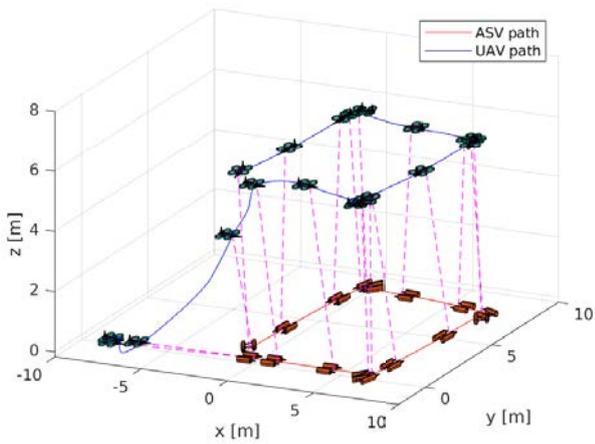


Figura 9: Segunda simulación $s_c = 6\text{ m}$, $of_c = 0\text{ m}$, $la_c = 0\text{ m}$, $\gamma_c = \theta_c$.

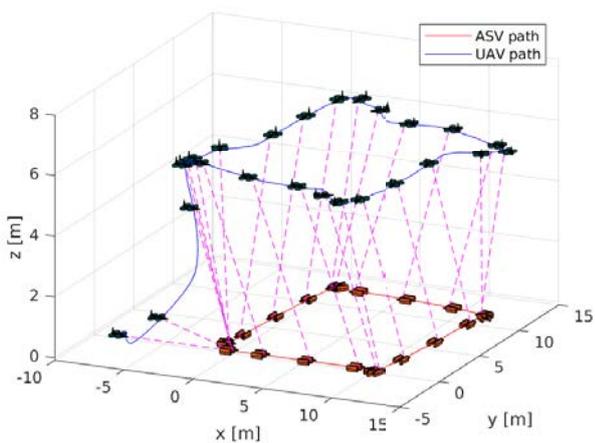


Figura 10: Tercer simulación $s_c = 6\text{ m}$, $of_c = 0\text{ m}$, $la_c = -3\text{ m}$, $\gamma_c = \theta_c$.

La Figura 8 muestra el resultado de la primera formación simulada. En este caso se eligieron como parámetros $s_c = 6\text{ m}$, $of_c = 0\text{ m}$, $la_c = 0\text{ m}$, $\gamma_c = 0^\circ$. De este modo

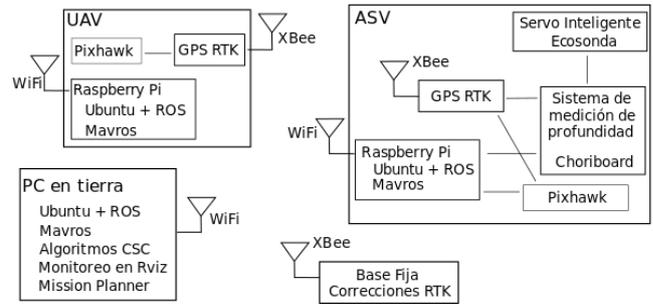


Figura 11: Diagrama de bloques del *setup* para las pruebas experimentales

el UAV sigue al ASV *desde arriba*, con un *swath* de 6 m y manteniendo la orientación en todo el recorrido. Este escenario es ideal para realizar ajustes en los lazos de control de la formación. En la segunda simulación, Figura 9, se toma como referencia de orientación del UAV, el valor de la orientación del cluster. Finalmente la tercera formación, Figura 10, es realizada con $s_c = 6\text{ m}$, $of_c = 0\text{ m}$, $la_c = -3\text{ m}$, $\gamma_c = \theta_c$, esto es, el UAV siguiendo al ASV, 3 m detrás de este.

Estos y otros escenarios permitieron ajustar los lazos de control de la formación. Los valores obtenidos fueron el punto de partida para lo la obtención de los parámetros utilizados en las pruebas con los vehículos reales.

VI-B. Pruebas experimentales

La validación experimental fue llevada a cabo utilizando un ASV [36] desarrollado por el grupo, junto a un hexa-rotor armado a partir de un *frame* de la empresa DJI. La computadora de bajo nivel de ambos vehículos es un pixhawk, mientras que la computadora de alto nivel es una Raspberry Pi modelo 3B+, corriendo el sistema operativo Ubuntu 16.04 junto al meta sistema operativo ROS kinetic. Los algoritmos de control del cluster, programados como nodos de ROS, corrieron en una laptop ubicada en tierra, la cuál posee el sistema operativo Ubuntu 18.04 junto a ROS Melodic. La comunicación entre las tres computadoras fue realizada por medio de una red WiFi. Cada uno de los vehículos posee una placa de red inalámbrica, externa, conectada por medio de un cable USB a sus respectivas Raspberry Pi. La computadora en tierra es conectada al router WiFi por medio de un cable ethernet, de este modo se establece la comunicación entre las tres computadoras. La orientación de las antenas en los vehículos es crucial para obtener buena señal entre el router en tierra y los vehículos. Para el sistema de posicionamiento de los vehículos se utilizó GPS con correcciones RTK, para ello se utilizaron módulos desarrollados por la empresa ArduSimple, basados en el receptor uBlox F9P. Los mensajes de corrección entre la base fija y los vehículos son enviados por medio de un enlace XBee de largo alcance. La Figura 11 muestra un diagrama con los componentes descriptos. Las pruebas fueron realizadas en el arroyo "Las Hermanas", en la localidad de Ramallo, en la guardería náutica Nautilus. Para el guiado del ASV, el líder de la formación, se utilizó el software MissionPlanner [38] con el fin de programar una misión, compuesta por cuatro *waypoints* y con una repetición de cinco vueltas, como se observa en la Figura 12.

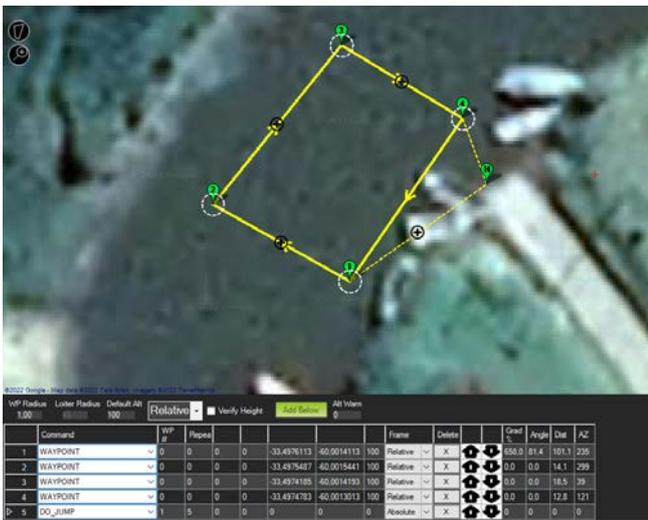


Figura 12: Misión del experimento llevado a cabo.

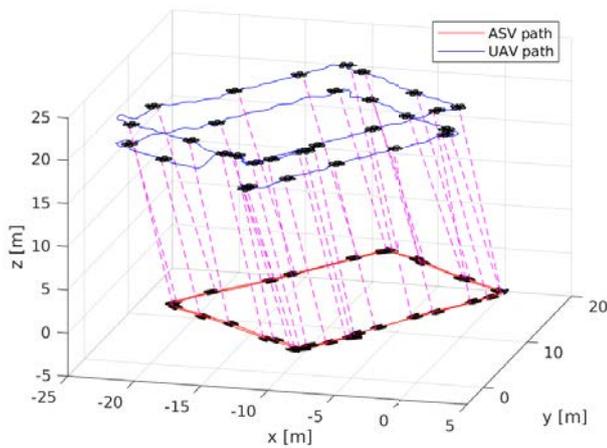


Figura 13: Primeras dos vueltas del experimento realizado.

En esta prueba experimental se tomaron como referencias de las variables de estado de la formación $s_c = 35$ m, $of_c = 0$ m, $la_c = 0$ m y $\gamma_c = \theta_{ASV}$ para la primera vuelta y $s_c = 30$ m, $of_c = 0$ m, $la_c = 0$ m y $\gamma_c = \theta_{ASV}$ para la segunda vuelta del recorrido. Todos los datos de la formación son logueados en la computadora donde se corren los algoritmos. En la Figura 13 se puede observar el recorrido realizado por cada uno de los vehículos. Las líneas de trazo punteado magenta unen las poses de los vehículos en el mismo instante de tiempo. Se puede ver cómo el ASV sigue la trayectoria comandada por el piloto automático uniendo los cuatro waypoints mientras que el UAV sigue dicho movimiento manteniendo los parámetros de la formación.

En la Figura 14 observamos el control del parámetro *swath* del cluster así como el cambio de referencia en el tiempo $t = 130$ s. Puede verse también el correcto funcionamiento del controlador dado el acotado error en dicho parámetro durante el experimento.

La Figura 15 muestra el comportamiento de este parámetro así como el error respecto de la referencia. Si bien el error está acotado, se puede notar un sesgo de alrededor de 0,5 m. Esto puede ser atribuido a una deficiencia en el

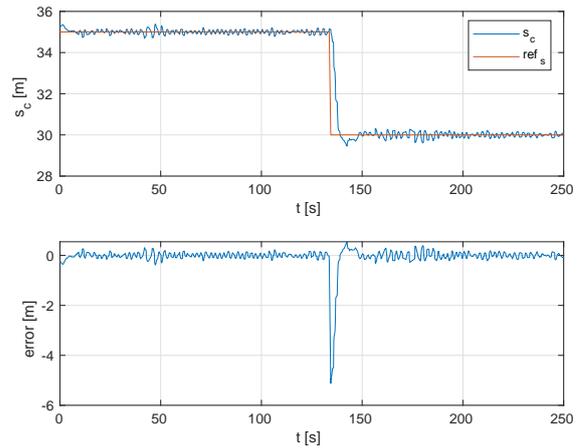


Figura 14: Parámetro s_c de la formación.

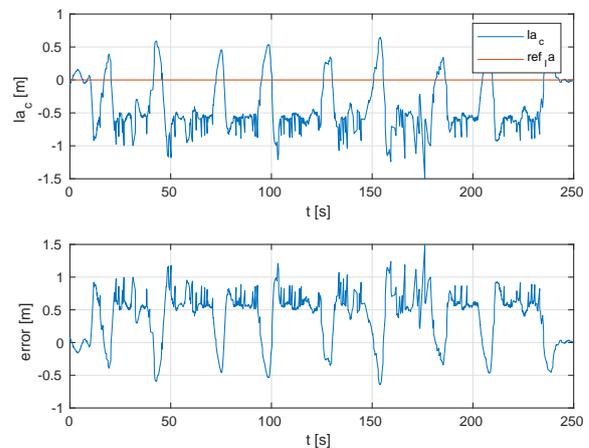


Figura 15: Parámetro la_c de la formación.

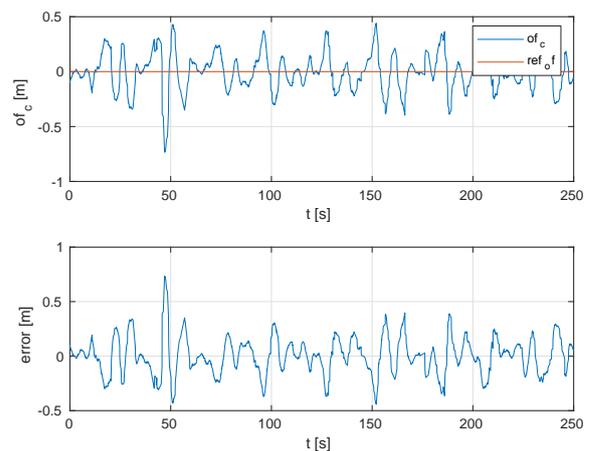


Figura 16: Parámetro of_c de la formación.

término integral del controlador PID.

Las Figuras 16 y 17 muestran el comportamiento de los parámetros of_c y γ_c , respectivamente, así como el error respecto de las referencias. Puede observarse un muy buen desempeño del controlador de la formación.

En la Figura 18 puede observarse la formación conforma-

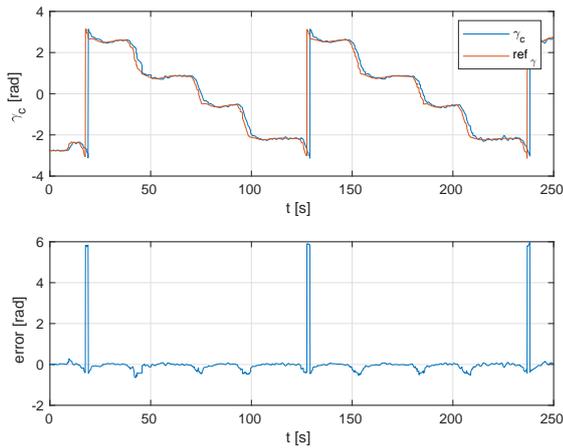


Figura 17: Parámetro γ_c de la formación.



Figura 18: Vehículos reales durante una prueba de campo (ASV navegando en el arroyo y UAV sobrevolándolo).

da por ambos robots.

VI-C. Relevamiento del arroyo "Las Hermanas"

El siguiente experimento consistió en el relevamiento batimétrico de una zona del arroyo "Las Hermanas". El marco de referencia en el cual se representan los datos

obtenidos es *ENU* (East-North-Up). El origen de dicho marco fue ubicado en el punto *Latitud* = $-33,4975331$, *Longitud* = $-60,0013008$ y *Altura* = $25,367$, correspondiente a la bajada de embarcaciones de la guardería náutica Nautilus.

Para el relevamiento se utilizó el sistema de guiado por *Waypoints* del piloto automático *Pixhawk* [39] utilizando el firmware *Arduover* [40]. La generación de los puntos fue realizada con el software *MissionPlanner* y corregidos *in-situ* debido al desplazamiento de las coordenadas en el mapa usado como base, en este caso los provistos por *Google Maps*. La figura 19 muestra la misión generada para este experimento.



Figura 19: Waypoints y trayectoria de la misión.

La figura 20 muestra la superposición de los puntos relevados con una imagen de alta resolución de la zona, producto del relevamiento realizado con un UAV. Dicha imagen fue ensamblada utilizando el paquete *OpenDroneMap* [41], y es parte del proyecto de monitoreo autónomo utilizando un UAV y un ASV para misiones extensas [5], [31].



Figura 20: Superposición de las mediciones con una imagen de la zona.

Para el post-procesamiento de los datos obtenidos se utilizó el software *QGIS* [42], un sistema de información

geográfica libre, versión 3.22.3-Białowieża. Con QGIS se creó una malla para la superficie que se observa en la figura 21, mediante la interpolación de los puntos relevados utilizando el método TIN [43].

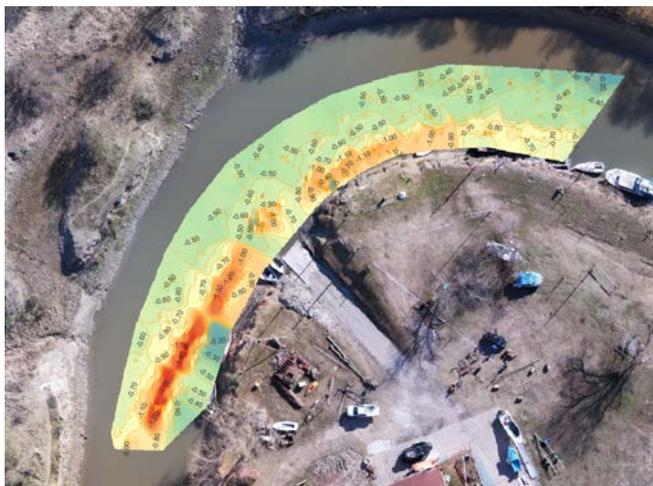


Figura 21: Mapa de contornos de profundidad de la zona relevada. Imagen obtenida desde el UAV.

VII. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo presentamos una formación entre un UAV y un ASV basada en la técnica *Cluster Space Control*. Gracias a dicha técnica fue posible elegir parámetros con los que modificar la posición y orientación del UAV respecto del ASV, de forma simple. Con este tipo de formación es posible realizar monitoreo de cuencas fluviales. Como trabajo futuro, se planea dotar al ASV con sensores tales como una ecosonda, un sensor de temperatura y pH o incluso un sistema de toma de muestras de agua, mientras que el UAV puede realizar estudios del aire, tomar imágenes para fotogrametría o mapas digitales de elevación y utilizar este sistema multirobot para la recolección de datos ambientales y su posterior procesamiento y análisis. La formación propuesta pudo ser validada tanto en un entorno de simulación como con los vehículos reales.

Se presentó el diseño, el proceso de construcción y la puesta en marcha de un vehículo no tripulado de superficie equipado con un sensor de bajo costo para realizar batimetría en aguas poco profundas. El sensor está formado por una ecosonda de simple haz, montada en un dispositivo rotatorio que permite un barrido de mediciones para aumentar de esta forma la capacidad del sistema. La plataforma fue validada experimentalmente en un entorno controlado y en un escenario natural.

Como trabajo futuro se puede mencionar el estudio del impacto de posibles retardos en las comunicaciones, en especial las establecidas en la red WiFi, así como el análisis de perturbaciones medioambientales, como ser el viento o la corriente del cauce de agua en donde opera el ASV.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por los proyectos PICT-2019-2371 y PICT-2019-0373 de la Agencia Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, UBACyT 0421 de la Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina

y el proyecto PID CCUTISN0007731TC de la Universidad Tecnológica Nacional.

Los autores quieren dar un especial agradecimiento al señor Francisco Salazar, dueño de la guardería náutica Nautilus, quien puso a disposición del grupo las instalaciones donde se desarrollaron todas las pruebas del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] M. Dunbabin, A. Grinham, and J. Udy, "An autonomous surface vehicle for water quality monitoring," in *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2009)*, S. Scheding, Ed. Sydney, Australia: Australian Robotics and Automation Association, 2009, pp. 1–6.
- [2] S. Bhattacharya, H. Heidarsson, G. Sukhatme, and V. Kumar, "Cooperative control of autonomous surface vehicles for oil skimming and cleanup," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 2374–2379.
- [3] J. Melo and A. Matos, "Guidance and control of an asv in auv tracking operations," in *OCEANS 2008*. IEEE, 2008, pp. 1–7.
- [4] P. Kimball, J. Bailey, S. Das, R. Geyer, T. Harrison, C. Kunz, K. Manganini, K. Mankoff, K. Samuelson, T. 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)*. IEEE, 2014, pp. 1–7.
- [5] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet, "Autonomous vehicles for outdoor multidomain mapping," in *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, June 2018, pp. 1–8.
- [6] G. G. Acosta, B. Menna, R. de La Vega, L. Arrien, H. Curti, S. Villar, R. Leegstra, M. D. Paula, I. Carlucho, F. Solari, and A. Rozenfeld, "MACABOT: prototipo de vehículo autónomo de superficie (ASV)," in *XI Jornadas Argentinas de Robotica*, Nov. 2017.
- [7] 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)*, June 2015, pp. 534–542.
- [8] 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)*, May 2018, pp. 1–8.
- [9] 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)*, May 2018, pp. 1–6.
- [10] X. Xiao, J. Dufek, T. Woodbury, and R. Murphy, "Uav assisted usv visual navigation for marine mass casualty incident response," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 6105–6110.
- [11] Z. Wang and D. Gu, "A local sensor based leader-follower flocking system," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 3790–3795.
- [12] R. Fierro, A. Das, J. Spletzer, J. Esposito, V. Kumar, J. P. Ostrowski, G. Pappas, C. J. Taylor, Y. Hur, R. Alur *et al.*, "A framework and architecture for multi-robot coordination," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 10-11, pp. 977–995, 2002.
- [13] B. Smith, A. Howard, J.-M. McNew, J. Wang, and M. Egerstedt, "Multi-robot deployment and coordination with embedded graph grammars," *Autonomous Robots*, vol. 26, no. 1, pp. 79–98, 2009.
- [14] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, "A vision-based formation control framework," *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 18, no. 5, pp. 813–825, 2002.
- [15] J. Esposito, M. Feemster, and E. Smith, "Cooperative manipulation on the water using a swarm of autonomous tugboats," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 1501–1506.
- [16] J. Dolan, G. Podnar, S. Stancliff, K. Low, A. Elfes, J. Higinbotham, J. Hosler, T. Moisan, and J. Moisan, "Cooperative aquatic sensing using the telesupervised ocean sensor fleet," *Proceedings of Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions*, vol. 7473, pp. 1–12, 2009.
- [17] C. A. Kitts and I. Mas, "Cluster space specification and control of mobile multirobot systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 2, pp. 207–218, 2009.
- [18] M. Dunbabin, A. Grinham, and J. Udy, "An autonomous surface vehicle for water quality monitoring," in *Australasian conference on robotics and automation (ACRA)*. Citeseer, 2009, pp. 2–4.

- [19] M. Caccia, R. Bono, G. Bruzzone, E. Spirandelli, G. Veruggio, A. Stortini, and G. Capodaglio, "Sampling sea surfaces with sesamo: an autonomous craft for the study of sea-air interactions," *IEEE robotics & automation magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 95–105, 2005.
- [20] T. Adamek, C. A. Kitts, and I. Mas, "Gradient-based cluster space navigation for autonomous surface vessels," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 506–518, April 2015.
- [21] I. Mas and C. Kitts, "Cooperative tasks using teams of mobile robots," in *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, ser. Lecture Notes in Electrical Engineering, H. K. Kim, S.-I. Ao, M. A. Amouzegar, and B. B. Rieger, Eds. Springer Netherlands, 2014, vol. 247, pp. 83–99. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-6818-5>
- [22] P. Mahacek, C. Kitts, and I. Mas, "Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 17, no. 1, pp. 65–75, Feb 2012.
- [23] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet, "Coordinated asv-uav control for marine collision-free navigation," in *2019 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [24] C. Specht, E. Świtalski, and M. Specht, "Application of an autonomous/unmanned survey vessel (asv/usv) in bathymetric measurements," *Polish Maritime Research*, vol. 24, no. 3, pp. 36–44, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0088>
- [25] E. Iscar and M. Johnson-Roberson, "Autonomous surface vehicle 3d seafloor reconstruction from monocular images and sonar data," in *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 2015, pp. 1–6.
- [26] Clear Path Robotics. Heron usv. [Online]. Available: <https://www.clearpathrobotics.com/heron-unmanned-surface-vessel/>
- [27] B. Menna, M. S. Villar, and G. Acosta, "Navigation system for MA-CABOT an autonomous surface vehicles using GPS aided strapdown inertial navigation system," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 6, pp. 1009–1019, 2019.
- [28] S. A. Villar, A. Madirolas, A. G. Cabreira, A. Rozenfeld, and G. G. Acosta, "ECOPAMPA: A new tool for automatic fish schools detection and assessment from echo data," *Heliyon*, vol. 7, no. 1, pp. 2405–8440, 2021.
- [29] D. Mallace, "World's first fully autonomous hydrographic survey," 2018. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/mallace2018>
- [30] E. Pinto, F. Marques, R. Mendonça, A. Lourenço, P. Santana, and J. 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)*. IEEE, 2014, pp. 443–450.
- [31] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet, "Navegación fluvial autónoma asistida por visión aérea," in *X Jornadas Argentinas de Robótica*, 11 2019.
- [32] EchoLogger. Ecosonda ECT400. [Online]. Available: <https://www.echologger.com/products/single-frequency-echosounder-deep>
- [33] ArduSimple. ArduSimple GPS-RTK. [Online]. Available: <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b-heading-basic-starter-kit-ip67/>
- [34] L. Garberoglio, M. Meraviglia, C. D. Pose, J. I. Giribet, and I. Mas, "Choriboard III: A small and powerful flight controller for autonomous vehicles," in *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)*, 2018, pp. 1–6.
- [35] L. Garberoglio, C. D. Pose, J. I. Giribet, and I. Mas, "Diseño de un autopiloto para pequeños vehículos no tripulados," *Elektron*, vol. 3, no. 1, pp. 29–38, 2019.
- [36] L. Garberoglio, P. Moreno, I. Mas, and J. I. Giribet, "Vehículo de superficie no tripulado para batimetría autónoma," in *XI Jornadas Argentinas de Robótica*, 03 2022.
- [37] F. Furrer, M. Burri, M. Achtelik, and R. Siegwart, *RotorS – A Modular Gazebo MAV Simulator Framework*. Springer, Cham, 01 2016, vol. 625, pp. 595–625.
- [38] Mission Planner. Mission planner. [Online]. Available: <https://ardupilot.org/planner/>
- [39] Pixhawk. Pixhawk autopilot. [Online]. Available: <https://pixhawk.org/>
- [40] Arduover. Arduover firmware. [Online]. Available: <https://ardupilot.org/rover/>
- [41] OpenDroneMap. Software de mapeo con drones opendronemap. [Online]. Available: <https://www.opendronemap.org/>
- [42] QGIS. Qgis un sistema de información geográfica libre y de código abierto. [Online]. Available: <https://www.qgis.org/es/site/>
- [43] TIN. Triangulated irregular network. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html#triangulated-irregular-network-tin