

Centro de Control de Tierra para Colaboración de Vehículos Autónomos Marinos

Bonache Seco, J.A.*, Dormido Canto, J., Montalvo Martinez, M., López-Orozco, J.A., Besada Portas, E., de la Cruz Garcia, J.M.

Dpto. Arquitectura de Computadores y Automática. Fac. CC. Físicas (UCM). Av. Complutense s/s. 28040 Madrid (España).

Resumen

El Centro de Control de Tierra (CCT) es uno de los elementos imprescindibles para la supervisión y control de vehículos autónomos que realizan misiones complejas. En la actualidad cada vez hay más aplicaciones donde se utilizan múltiples vehículos autónomos y el tradicional Centro de Control está evolucionando para ser capaz de gestionar diversos vehículos y operadores. Este artículo presenta las características más relevantes de un CCT adaptable y versátil, especialmente diseñado para que un equipo heterogéneo de operadores puedan monitorizar y supervisar el funcionamiento colaborativo de un conjunto heterogéneo de vehículos autónomos. Entre estas características destacan la posibilidad de, según las necesidades de los operadores y de la misión, 1) reconfigurar cuál (y cómo) es la información que se muestra de cada vehículo a cada operador, 2) definir alarmas que atraigan la atención de los operadores ante determinados eventos (y liberen su carga de trabajo mientras estos no se den) y 3) re-assignar en tiempo real la gestión de los vehículos a los diferentes operadores. Para alcanzarlas, se ha realizado un cuidadoso diseño de la arquitectura software del CCT, que se detalla en el artículo y que se encuentra formada por: un módulo de comunicaciones; un módulo planificador de alto nivel; un módulo (replicable en tantos equipos como se desee) de monitorización y supervisión de vehículos; y tantos módulos comandadores como vehículos diferentes existan en la misión. Este CCT ha sido desarrollado dentro del proyecto de investigación SALACOM (Sistema Autónomo de Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar), en el que dos barcos autónomos maniobran de forma colaborativa para desplegar una barrera para la contención de un vertido contaminante en el mar y donde la incorporación del operador en la supervisión y control de las maniobras de los vehículos es un requisito imprescindible para dar seguridad y confianza a la operación realizada. Finalmente, se presenta un caso de uso del Centro de Control de Tierra donde se realiza una maniobra de seguimiento entre dos vehículos autónomos de superficie.

Palabras Clave:

Monitorización y supervisión, Planificación y rutas, Control cooperativo, Control de sistemas distribuidos, Sistemas marinos y subacuáticos, Centro de control de tierra

A Ground Control Station for Collaborative Unmanned Surface Vehicles

Abstract

The Ground Control Station (GCS) is one of the essential elements to supervise and control autonomous vehicles performing complex missions. The increasing number of systems that involve multiple autonomous vehicles is making traditional GCSs evolve to let them handle different vehicles and operators. In this article, we present the more relevant properties of a versatile adaptable GCS that has been especially designed to let multiple operators, each using a different computer equipment, be in charge of controlling a heterogeneous team of autonomous vehicles. Its main properties are the possibility of 1) reconfiguring which information is displayed to each operator, 2) defining alarms to draw the operators attention when required, and 3) re-assigning, in real-time, the vehicles to different operators. These properties are supported by a distributed design of the GCS software architecture, presented in the paper and consistent of: a communication module, a high level planner, replicable monitoring and supervising units, and as many commanders as vehicles within each mission. This GCS has been developed within SALACOM (an autonomous system for locating and acting against sea spills), where two Unmanned Surface Vehicles (USVs) cooperate to collect a sea spill under the supervision of several operators that are responsible of the security of the mission. Finally, this paper also presents a case of use of the GCS within a real-world experiment involving two USVs performing leader-follower formation manoeuvres.

Keywords:

Monitoring and supervision, Route planning, Cooperative control, Distributed control systems, Marine and submarine systems, Ground control station

1. Introducción

En los últimos años debido al desarrollo de la tecnología y al descenso de sus costes, han proliferado multitud de pequeños vehículos autónomos aéreos (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), submarinos (AUV, Autonomous Underwater Vehicle) o de superficie (USV, Unmanned Surface Vehicle), utilizándose en tareas que involucran a un sólo vehículo (Ribas et al., 2012; Sutton et al., 2011; Patterson et al., 2013) o a una combinación de éstos (Murphy et al., 2008; Lindemuth et al., 2011). En muchas aplicaciones los múltiples vehículos autónomos deben actuar e interactuar en entornos humanos, lo que requiere la existencia de sistemas que realicen un seguimiento de las operaciones realizadas, guiar o asignar tareas y actuar en cualquier momento a fin de preservar la seguridad de la operación y de los demás agentes, incluyendo humanos. En muchos casos, para manejar un conjunto de vehículos autónomos se necesitará un equipo de operadores que, aunque no intervengan en las tareas críticas en tiempo y precisión, sí son imprescindibles para definir qué misiones hay que realizar o incorporar su experiencia y rápida respuesta en caso de emergencia. En estos casos se ha mostrado que introducir en el lazo de control a un humano mejora el experimento hasta un 50 % (Cummings et al., 2012). Por tanto se deberá tener en cuenta en todo momento al operador humano como un elemento más en el Centro de Control de Tierra. Independientemente del número de vehículos es necesario el uso de una aplicación de interfaz gráfico que permita al operador visualizar los datos del vehículo, del entorno que le rodea y, en determinadas situaciones, de la misión que debe cumplir. Esta es la función de un Centro de Control de Tierra (CCT). Además, cuando se monitorizan vehículos autónomos heterogéneos, éstos deben ser tratados como entidades independientes, al igual que se haría con vehículos gobernados por humanos. Por tanto, el CCT deberá manejar una variedad de tecnologías y recursos diferentes, ya que los vehículos pueden ser soportados por diversas plataformas hardware con distintos sistemas operativos y gobernados por lenguajes de programación diferentes. Así, cuanto mayor sea el grado de autonomía y mayor sea la diversidad de vehículos, mayor deberá ser la abstracción en el Centro de Control para unificar la información y facilitar el seguimiento y control de la misión por parte de un operador. Algunos ejemplos de Centros de Control que tratan con vehículos heterogéneos son: en un entorno militar (Heo et al., 2016), el entorno ASMAC para múltiples vehículos submarinos (Mupparapu et al., 2004), el sistema de vigilancia AMFIS capaz de fusionar y presentar datos de sensores de vehículos aéreos y terrestres (Bürkle et al., 2011), el Centro de Control para entornos marinos diseñado en el proyecto europeo MUNIN dentro del 7º programa marco (Burmeister et al., 2014) y el Centro de Control inmersivo que incorpora nuevas tecnologías como la realidad virtual (Walter et al., 2004). El Centro de Control de Tierra que se presenta en este artículo forma parte del proyecto SALACOM (Sistema Autónomo de

Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar), financiado por el Programa Español de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un sistema compuesto por vehículos autónomos marinos de superficie (USVs), submarinos (AUVs) y aéreos (UAVs) que, en caso de un accidente que provoque un vertido contaminante (en especial de hidrocarburos), pueda realizar una actuación rápida para minimizar el impacto sobre el medio ambiente. El problema se acentúa cuando el vertido tiene lugar en puntos próximos a la costa, donde las aguas son poco profundas y la presencia de rocas dificultan la actuación de buques de gran calado, que son los que normalmente se utilizan para la recogida y control de contaminantes en alta mar. Es en estos casos cuando los vehículos autónomos marinos y aéreos de pequeño tamaño y bajo coste de operación resultan de especial interés en la respuesta rápida, impidiendo que los vertidos contaminantes alcancen la costa con el consiguiente beneficio económico y medioambiental. Así, el sistema de contención desarrollado en el proyecto consta de dos USVs capaces de actuar de forma individual y dirigirse a distintas zonas, detectar la existencia de vertidos y desplegar una barrera de protección sobre una zona determinada; o de trabajar en colaboración para arrastrar una red de contención con la configuración más adecuada para la recogida del vertido. Los UAVs, que pueden ser transportados por los USVs hasta la zona próxima del vertido o despegar desde tierra, se encargan de localizar el contaminante y pasar la información a los USVs para su actuación. Además, se tiene previsto la posibilidad de utilizar un AUV que apoye en tareas de localización de los vertidos contaminantes. Para conseguir el objetivo del proyecto se identifican los siguientes subobjetivos: (1) experimentación, modelado y control de los USVs para que puedan llevar una barrera de contención; (2) desarrollo de algoritmos de búsqueda y coordinación de UAVs y USVs; (3) desarrollo e incorporación de sistemas de percepción para detección de los contaminantes en el mar y para la navegación; (4) construcción de un centro de control para monitorización, guiado, planificación y coordinación de los vehículos autónomos; y (5) establecimiento de un entorno para coordinación de los vehículos de superficie con un vehículo submarino. El CCT está directamente relacionado con los subobjetivos (4) y (5) del proyecto, pero debe dar soporte a todos los demás. Inicialmente se desarrollaron entornos de control y monitorización para cada vehículo que fueron utilizados para identificación y modelado de éstos, así como para realizar tareas individuales. Pero no se disponía de un CCT que integrase todos ellos, permitiese experimentar con diferentes algoritmos para realizar las operaciones de cooperación y arrastre de barreras mencionadas y pudiese seguir incluyendo la participación del operador como un elemento importante en el CCT, de modo que se pudiese utilizar como los centros de control previos en caso de que los vehículos estuviesen realizando operaciones independientes entre sí (pero donde ahora

* Autor para correspondencia: jbonache@ucm.es

To cite this article: Bonache Seco J.A., Dormido Cantó J., Montalvo Marínez M., López-Orozco J.A., Besada Portas E., de la Cruz García J.M. A Ground Control Station for Collaborative Unmanned Surface Vehicles. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 15 (2018) 1–11.

<https://doi.org/10.4995/riai.2017.8737>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4,0 International (CC BY-NC-ND 4,0)

podrían necesitar conocer la situación de los otros vehículos), o cambiar de misión y pasar de una tarea individual a una tarea en cooperación. Los requisitos que se han identificado como prioritarios en el diseño del CCT para satisfacer estos objetivos y cómo ha sido implementado son señalados en la sección 2. En la sección 3, se describe la arquitectura del CCT destacando los módulos más importantes que lo componen y cómo se relacionan y satisfacen las necesidades identificadas. Por último, en la sección 4, se verificará su funcionamiento en una experiencia real destacando la interacción entre los distintos módulos y la consecución de los requisitos definidos. El CCT ha sido desarrollado para que pueda ser utilizado por todos los vehículos especificados en el proyecto, pero puede ser fácilmente utilizable por otros vehículos. Actualmente en el proyecto se cuenta con dos USV cuyas características se describen en la sección 4, un UAV, dron comercial md4-200 de Microdrones y un AUV de la clase MEDUSA desarrollado por el Instituto de Sistemas y Robótica del Instituto Técnico de Lisboa. El UAV está siendo controlado y monitorizado desde el Centro de Control pero aún no se ha integrado junto con los USVs en ninguna misión y el AUV todavía no se ha incorporado en el CCT, por lo que para mostrar la funcionalidad del CCT se han utilizado los dos USV.

2. Diseño del Centro de Control de Tierra

En esta sección se destacan qué características debe poseer el CCT para que pueda cumplir con los objetivos del proyecto SALACOM y qué decisiones se han tomado para su implementación.

2.1. Requisitos del CCT

El primer requisito que debe satisfacer el CCT es que sea configurable para diferente tipo y número de vehículos y permita que los vehículos trabajen de forma autónoma. El segundo, y no menos importante, es que incluya en el lazo de la misión al operador humano para tareas de supervisión y control, y que el operador u operadores puedan ocuparse de un sólo vehículo autónomo o de varios según las necesidades de cada momento. Pero además, dado que los vehículos pueden realizar diferentes operaciones de búsqueda o cooperación en distintas fases de una misión, el CCT se ha diseñado para que se puedan configurar, en tiempo real tres aspectos importantes: Por una parte la *monitorización*, puesto que se pueden organizar los componentes visuales en base a criterios ergonómicos y preferencias del operador en cada misión. Incluso, según la fase o estado de la misión, el usuario puede dinámicamente poner más énfasis en ciertos aspectos gráficos ocultando los que no sean relevantes en ese momento. Así, por ejemplo, se monitorizan diferentes parámetros si un USV está navegando hacia una zona determinada, localizando vertidos o arrastrando una barrera; o en el caso de un UAV es diferente qué aspectos monitorizar cuando está buscando vertidos que cuando se están realizando maniobras de despegue o aterrizaje. Por otra parte, la *coordinación y control* de vehículos o formaciones, porque facilita al operador la definición de distintas maniobras básicas de forma sencilla y directa, puede ajustar los parámetros del control según la misión, y definir qué actuación realizar frente a alarmas de los

vehículos. Y finalmente, la *reorganización de recursos* que permite asignar operadores a los vehículos dependiendo de la misión y reorganizarlos en tiempo real en caso de que, por ejemplo, su carga de trabajo sea excesiva o la misión requiera una supervisión especial en uno de los vehículos. Así, en maniobras críticas de arrastre de barreras de los USV o en ciertas misiones del UAV puede ser necesario la supervisión y control en exclusiva de un operador, delegando la monitorización y control de los demás vehículos a otros operadores. Otro requisito que queremos incluir en nuestro diseño es que sea lo suficientemente genérico para que puedan incorporarse otros vehículos y pueda ser utilizado en otras situaciones que requieran la coordinación de vehículos heterogéneos donde la monitorización e intervención humana sea importante. En la figura 1, puede verse esquematizado nuestro Centro de Control de Tierra que consta de un número variable de equipos denominados Sistemas de Monitorización y Control (SMC) para la gestión de los vehículos involucrados. Un vehículo sólo puede ser controlado por un SMC, aunque un SMC puede controlar a más de un vehículo. Además un SMC puede monitorizar a varios vehículos. Por lo tanto, en el ejemplo de la figura 1 podría existir una configuración como la siguiente: el SMC1 se ocupa del control de los dos barcos, el SMC2 del dron y el SMC3 del submarino, y los otros equipos son utilizados únicamente para la monitorización de la misión realizada. En caso de que fuese necesario, cualquier operador (o SMC) puede ceder el control de un vehículo a otro SMC. Por ejemplo, si en una fase de la misión el operador del SMC1 no puede atender simultáneamente a los dos barcos, éste podría ceder a cualquiera de los otros SMC el control de uno de los barcos, ya sea a un SMC que está realizando el control de otro vehículo o a un SMC que sólo está monitorizando. Más adelante veremos cómo se realiza esta operación.

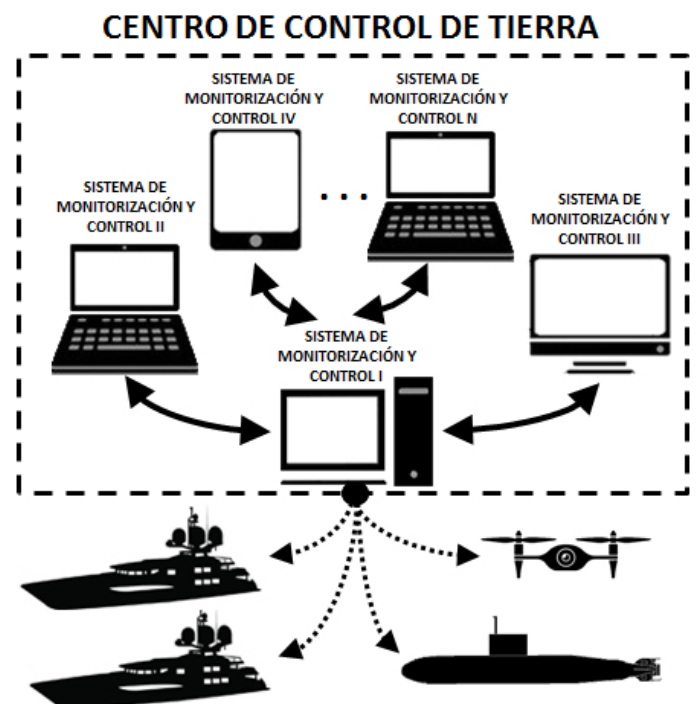


Figura 1: Centro de Control de Tierra

2.2. Implementación del CCT

El uso de Centros de Control de Tierra en vehículos autónomos está muy extendido en UAVs pero no en USVs. El principal motivo es que, debido a su propia naturaleza remota, se ha hecho necesario el uso de interfaces de comunicación con el UAV que han desembocado en el desarrollo de interfaces de comunicación estándar como STANAG 4586 (STANAG4586, 2012) o MAVLink (MAVLINK, 2017). Esto ha permitido que el software desarrollado pueda ser utilizado para diferentes modelos de UAVs, dando lugar a la aparición de multitud CCT (conocidas también como GCS, Ground Control Station), tanto comerciales, por ejemplo mdCOCKPIT (mdCOCKPIT, 2017), como de código libre, por ejemplo QGroundControl (QGroundControl, 2017). Sin embargo, esto no ocurre en la actualidad en el caso de los USVs puesto que no hay una interfaz que permita la interoperatividad entre diferentes vehículos. El comité F41 on Unmanned Maritime Vehicle Systems del ASTM International (American Society for Testing and Materials) (ASTM, 2017), una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo, tiene entre sus objetivos el desarrollo de un estándar o guía de comunicaciones para USVs, pero actualmente sólo está disponible para vehículos submarinos. En consecuencia, a día de hoy la mayoría de los CCT orientados a USV son software comerciales desarrollados ad-hoc para un tipo específico de vehículo y muy pocos diseñados para contemplar diferentes USV como WGMS (Wave Glider Management System) (WGSM, 2017) o ASView Control System (ASV, 2017). Se evaluaron Centros de control existentes de código abierto como LibrePilot (LibrePilot, 2015) o QGroundControl (QGroundControl, 2017) con el fin de adaptar el código a nuestros vehículos, pero se observó que estaban muy orientados al uso de drones y la mayoría de los recursos disponibles no nos eran de utilidad, ni siquiera el uso de mapas 3D de Google puesto que en el medio marino no se requiere una representación gráfica a ese detalle. Por lo tanto se optó por desarrollar un CCT, implementado en Java (los Centros de Control previos de los vehículos estaban programados en Java), que cumpliera con los requisitos señalados previamente.

3. Arquitectura del Centro de Control de Tierra

La arquitectura identificada como eficaz para llevar a cabo todos los requisitos señalados se muestra esquematizada en la figura 2. Las diferentes tareas o módulos mostrados han sido concebidas para que puedan ser independientes unas de otras y para que sólo se relacionen a través de un interfaz claramente definido. Esto permite que puedan ser modificadas o sustituidas por diferentes versiones y que el cambio no afecte a otros módulos. Veamos en detalle el funcionamiento de cada módulo y cómo se integran en el Centro de Control de Tierra para satisfacer las necesidades planteadas en la sección anterior.

3.1. Servicio de Comunicaciones

En la figura 2, el Servicio de Comunicaciones (SC) corresponde a los bloques Servidor Central, Cliente y Registro Central. Es el único elemento del CCT que tiene comunicación directa con los vehículos, de modo que no se permite ninguna otra

comunicación con los mismos desde los SMC. Se ha implementado como una serie de librerías para permitir la comunicación de los vehículos con el CCT de modo que cualquier SMC utilice el mismo protocolo para leer y escribir, y por tanto la comunicación con cada vehículo es transparente para los SMC. El protocolo de comunicaciones utilizado ha sido diseñado con el propósito de ser ligero y sencillo, pero sería posible adaptarlo a protocolos existentes (ej. MAVLink). Este servicio se puede incluir en uno de los SMC o puede instalarse en un equipo dedicado exclusivamente a la comunicación entre los elementos del CCT. Los SMC disponen de un cliente para poder comunicarse con el SC. En el ejemplo de la figura 1 el Servicio de Comunicaciones está en el SMC1 y todos los demás tienen un cliente para comunicarse con él. El SC es el encargado de supervisar qué operadores o SMCs se conectan al sistema y qué vehículos desea controlar y/o monitorizar cada SMC. Para lograrlo, este módulo dispone de una base de datos de operadores/SMC que pueden acceder a los vehículos y unos permisos en los que se indica qué vehículos pueden controlar. También se encarga de gestionar y mandar las órdenes y comandos a los vehículos para que realicen las maniobras deseadas. Estas órdenes provienen de los SMC, a través del Comandador y el Planificador, donde el operador indica las maniobras que deben realizar los vehículos, tanto de alto nivel (p.e. que se siga una trayectoria definiendo los puntos finales e intermedios), como de bajo nivel (p.e. girar el timón un número de grados determinado). Además se encarga de recibir en todo momento la telemetría, estado y alarmas de todos los vehículos, realizando un registro de la operación y enviando la información a los SMC que corresponda. Un ejemplo de su funcionamiento es el siguiente: cuando un operador desea acceder al sistema, arranca un SMC que envía al SC su identificador, usuario y contraseña, y los barcos que desea controlar y visualizar. El SC comprueba si dicho operador/SMC está registrado en la base de datos y se procede del siguiente modo:

1. En caso de que no esté registrado, se lo comunica y le deniega el acceso, terminando la comunicación¹.
2. En caso de que esté registrado, comprueba qué permisos tiene y le comunica al SMC si puede controlar los barcos que incluía la petición de identificación. A partir de este momento, el SMC puede controlar los barcos enviando al SC los comandos y órdenes. A la vez, el SC le envía periódicamente la telemetría, alarmas y estado de los vehículos que quiere visualizar.

La comunicación entre los SMC y el SC se realiza utilizando un protocolo TCP/IP (sockets TCP) que permite establecer comunicaciones wifi o cableadas, independientemente de la plataforma y sistema operativo de los SMC. Para asegurarnos que las comunicaciones son seguras se utiliza el protocolo SSL (Secure Sockets Layer). Este protocolo hace uso del mecanismo de clave privada-pública, de manera que los usuarios se conectan al servidor central y envían las claves de sesión cifradas con la clave pública del servidor garantizando de este modo la confidencialidad en el paso de las claves. El usuario también le pasa al servidor sus claves públicas, de modo que el servidor le envía toda la información codificada mediante la clave

¹Se planteará en el futuro poner una contraseña o identificador definido para poder acceder como invitado.

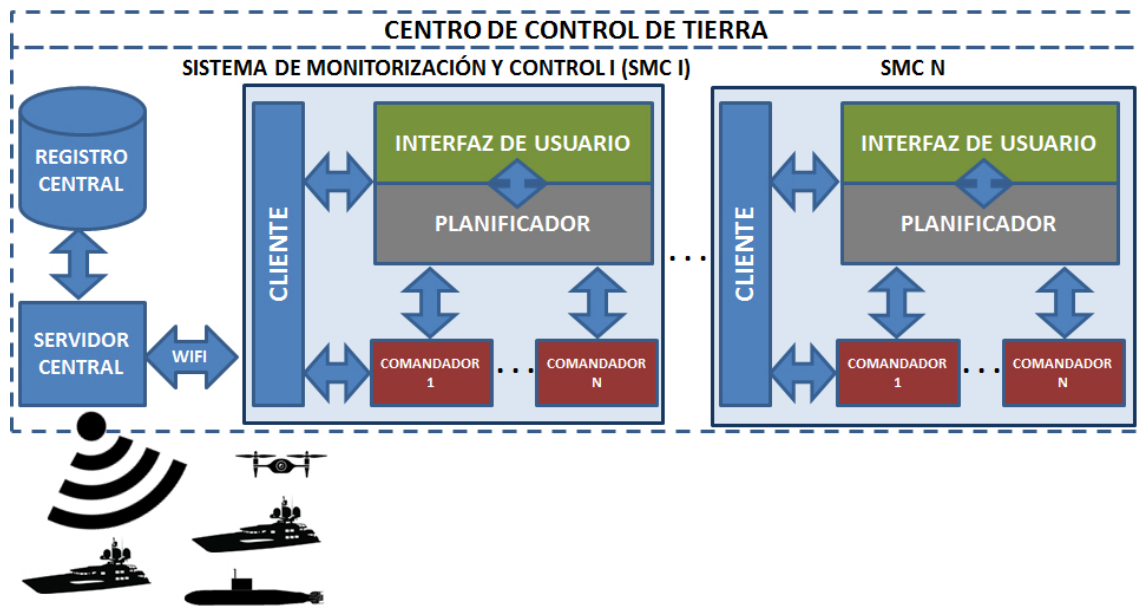


Figura 2: Arquitectura del Centro de Control de Tierra

pública del cliente y sólo éste la puede decodificar con su clave privada. Para llevar a cabo todos estos protocolos, en nuestra implementación, se ha empleado la API de Java Secure Sockets Extensión (JSSE). Para la comunicación entre los vehículos, el servidor puede utilizar wifi, radio o cualquier otra tecnología que requieran. Para dar soporte a los diferentes tipos de comunicación entre el vehículo y el SC, se incluyen en el SC las rutinas software que implementan el protocolo necesario para manejar el hardware que establece la comunicación con cada vehículo. De este modo los SMC del Centro de Control de Tierra son independientes del tipo de comunicación y protocolo asociado a cada vehículo. Esto permite realizar un intercambio de vehículos entre los SMC de forma sencilla o reemplazar el sistema de comunicación de un vehículo sin necesidad de modificar ningún SMC. En el proyecto se utiliza wifi para comunicarse con los vehículos. La comunicación con el UAV se realiza mediante sockets TCP como en el caso anterior y para comunicarse con los USV se utiliza el protocolo ADS (Automation Device Specification) sobre TCP/IP. Se utiliza ADS, capa de transporte proporcionada por el sistema TwinCAT de Beckhoff, porque el control embarcado en los USV es llevado a cabo por un PC Industrial Beckhoff y TwinCAT proporciona librerías para diferentes lenguajes que permiten la transmisión/lectura de las variables del PLC que sean especificadas.

3.2. Planificador

El planificador es el módulo o aplicación que se ocupa de generar comandos de alto nivel para que los vehículos realicen las diferentes trayectorias o misiones. A través de distintos entornos gráficos que proporciona el Planificador, y que pueden utilizarse desde el Interfaz de Usuario, se pueden definir, por ejemplo, puntos de paso, operaciones en puntos determinados o lanzar trayectorias predefinidas. Además, el Planificador, puede calcular la ruta más adecuada que pasa por los puntos que señale el operador en el mapa (a partir de tramos rectos y circulares) o generar trayectorias mediante curvas paramétricas

(lemniscata, elipse, círculo, seno, etc). Las trayectorias permitidas, y enviadas desde el planificador a los vehículos a través del comandante y el SC, son seguidas por el Control de los vehículos utilizando diferentes métodos de control y guiado (Lapierre and Soetanto, 2007; Park et al., 2007; de la Cruz et al., 2014, 2015, 2016). Otras funciones del Planificador son, por ejemplo, reaccionar ante alarmas de proximidad de un obstáculo en la trayectoria y obtener una ruta de evasión para esquivarlo, o verificar la integridad de operaciones más complejas como las formaciones de vehículos.

3.3. Comandador

Es el módulo del SMC encargado de enviar las órdenes provenientes del Planificador o del Interfaz de Usuario al Servicio de Comunicaciones para que las envíe al vehículo. Sólo existe un comandante activo por vehículo y, por tanto, sólo estará activo en uno de los SMC. En caso de transferir el control entre SMCs que tengan permiso para controlar un mismo vehículo, el Servicio de Comunicaciones transmite los parámetros de la misión actual entre las dos SMC y activa/desactiva el comandante correspondiente en ellas. Es el módulo más próximo al vehículo y es propio de él, permitiendo una mayor abstracción y generalización en el CCT. El Comandador se ocupa de recopilar la información que va o procede del vehículo, recogiendo la telemetría y alarmas del vehículo. Este módulo traduce las órdenes de alto nivel del Planificador en señales de bajo nivel por lo que es el componente del Centro de Control más próximo al control y al hardware del vehículo. También se encarga de enviar periódicamente una señal a los vehículos, de modo que estos conozcan que existe un operador activo que los está controlando y, por lo tanto, supervisando. Si los vehículos dejan de recibir esta señal durante un cierto periodo de tiempo, detienen de forma segura la misión o maniobra que estuvieran realizando. El Comandador dispone también de una Interfaz adaptada al vehículo comandado. En la figura 3 puede verse un ejemplo de la ventana del Comandador para uno de los barcos utilizados en la sección 4. Esta Interfaz muestra información propia

del vehículo y permite el control manual de éste, realizar operaciones y maniobras de ingeniería para comprobar el correcto funcionamiento del vehículo y de sus subsistemas, visualizar las alarmas y banderas de estado de todos sus subsistemas, e inhibir/habilitar aquellas alarmas que el operador considere oportunas. Las alarmas son un conjunto de banderas a nivel de drivers, subsistemas, vehículos y misión que permiten verificar el estado de cada elemento en todo momento. Sobre ellas se definen alarmas que pueden provenir del CCT (definidas por el usuario, por ejemplo al alcanzar una variable un cierto valor como puede ser el nivel de batería o la velocidad de un vehículo) o proceder de uno de los vehículos (cuando ha detectado una situación determinada). Estas alarmas se visualizan en el CCT y son dirigidas al Planificador para que actúe en consecuencia (enviando los comandos adecuados a los vehículos).

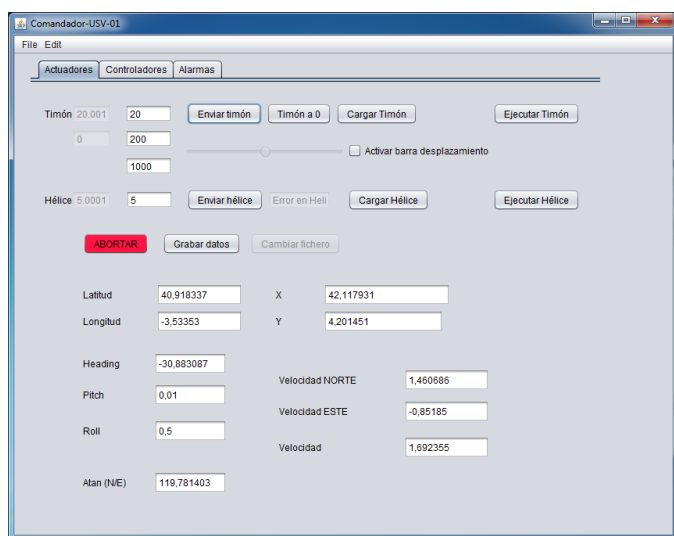


Figura 3: Ventana del Comandador

3.4. Interfaz de Usuario

El módulo Interfaz de Usuario permite al operador visualizar el estado y otros datos de los vehículos (posición sobre el mapa, datos de telemetría, gráficas temporales, etc.), e interactuar con los otros módulos por medio de menús. En dichos menús el operador puede elegir los parámetros que desea mostrar, solicitar nuevas funciones o desactivar algunas que ya tenga, mostrar/ocultar datos de algún vehículo o solicitar/renunciar al control de alguno de sus vehículos². También permite establecer rutas/puntos de paso en el entorno gráfico disponible (mapa), elegir el fichero en el que los puntos se encuentran almacenados, o modificar puntos de paso en tiempo de ejecución siempre que esto sea posible. Como parte de esta herramienta se incluye también un previsualizador de rutas que indica al usuario la ruta final que ha calculado el Planificador a partir de los puntos de paso introducidos y si ésta es válida. Finalmente, también muestra la interfaz propia del vehículo y los datos provenientes del Comandador. La Interfaz de Usuario utiliza librerías de Open Street Maps modificadas para visualizar el entorno y los vehículos en tiempo real. El entorno gráfico está dotado de las herramientas necesarias para su adaptación

en tiempo de ejecución (tamaño, posicionamiento, color, etc.) a las necesidades del operador en base a la misión, el equipo de vehículos autónomos disponible, y a ciertos parámetros ergonómicos. Todo esto permite que la visualización de los datos sea lo más eficiente posible. Además se pueden seleccionar los datos mostrados de forma automática utilizando los criterios de transparencia que defina el usuario. Todo ello es configurable por el usuario, dependiendo de la misión, mediante distintos archivos de configuración (Bonache Seco et al., 2016). Desde este entorno gráfico se muestra también la información sobre las alarmas procedentes de los vehículos mediante indicaciones visuales, véase la figura 4, y auditivas dependientes del nivel de prioridad (gravedad) de la alarma (configurables por el operador). Adicionalmente, el operador puede programar alarmas/notificaciones para recibir el aviso de que alguno de los datos recibidos ha alcanzado un valor o rango, de forma que pueda dedicar su atención a otras fases de la misión hasta que dicha alarma sea activada.

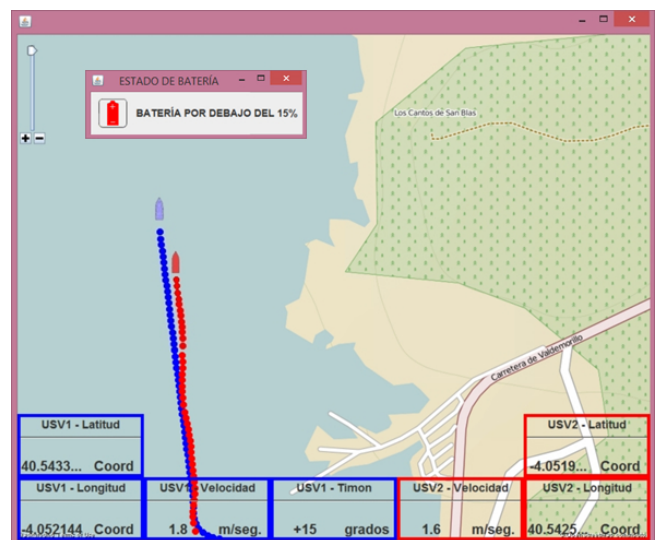


Figura 4: Interfaz de Usuario

En la figura 5, se muestra un esquema en el que se puede observar con más de detalle la composición de los módulos que conforman la arquitectura del CCT y algunos de los elementos que se han detallado a lo largo de esta sección. También figuran otros elementos de interés como tipos de mensajes y protocolos utilizados para el intercambio de información entre dichos módulos, algunas de las tareas que cada uno de ellos ha de realizar, etc. Así, por ejemplo, se puede observar que el módulo de Interfaz de Usuario, posee un módulo interno de comunicaciones que se encargará de gestionar la entrada/salida de datos y su desempaquetado para el posterior envío a la Interfaz Gráfica, que consta de un mapa y una serie de componentes gráficos que permiten visualizar toda esta información de forma rápida e intuitiva para cada uno de los vehículos gracias a la interfaz Updatable, que nos permite que cada elemento sepa cómo debe mostrar un dato gráficamente para que el usuario lo entienda (por ejemplo, un n° real de longitud doble puede mostrarse de una forma si es parte de una coordenada longitud-latitud en el

²Para realizar esta operación, se enviaría una solicitud al Servidor de Comunicaciones que tras que ser aprobada, establece el protocolo de cambio de Comandador

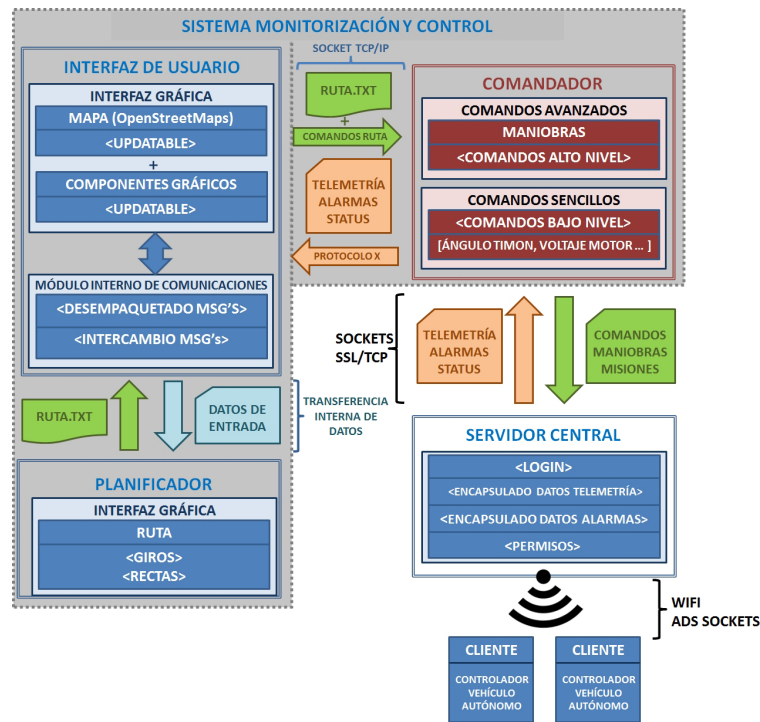


Figura 5: Mensajes y protocolos utilizados

mapa o de otra si es una velocidad en nudos que debe mostrarse en el velocímetro de uno de los barcos).

También se incluye en la figura 5 el cliente, módulo alojado en los vehículos que establece el protocolo de comunicación entre él y el Servicio de Comunicaciones del CCT; el control, también situado en el vehículo y más próximo a su hardware, se encarga de recibir los parámetros de la misión que se generaron en el Planificador (Ruta.txt) y le han llegado desde su Comandador correspondiente (ya sean comandos a bajo nivel como un ángulo de timón o una maniobra de alto nivel) y actuar sobre el vehículo; El Servidor Central se encarga también de validar los Permisos de Control y Login para cada SMC con los datos alojados en el Registro Central visto previamente. Se contará, además, con un módulo de Datos Externos que recibirá la información del entorno útil para el desarrollo de la misión como corrientes, viento, localización de vertidos, etc. y la enviará al Planificador para que éste actúe en consecuencia.



Figura 6: USVs del experimento

4. Pruebas de campo del Centro de Control

El Centro de Control de Tierra descrito en las secciones anteriores se ha utilizado en ensayos sobre un sistema real en el marco del proyecto SALACOM. El experimento mostrado a continuación se ha llevado a cabo en el pantano de Valmayor, en la Comunidad de Madrid. Para verificar el funcionamiento del Centro de Control, como ya se ha indicado en la introducción, se utilizarán dos USV. El experimento que se muestra a continuación consiste en programar una maniobra de seguimiento entre un USV que actúa como líder y otro que se comporta como seguidor.

Los dos USV del proyecto, que pueden verse en la figura 6, han sido construidos por el Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo (CEHIPAR). Corresponden a modelos de buques reales a escala. El USV1 corresponde a un modelo de 4 metros de eslora a escala 1:10.8, velocidad máxima de 4 m/s, tara de 136 Kg y está lastrado con 100 kg (el 50 % de su capacidad de carga). El USV2 es un modelo de 5 metros de eslora a escala 1:15, velocidad máxima de 4 m/s, tara de 277 Kg y está lastrado con 360 kg (el 50 % de su capacidad de carga). Un modelo matemático, obtenido mediante programación genética, de uno de estos barcos puede encontrarse en (Moreno-Salinas et al., 2015). Estos barcos disponen de IMU y receptor GPS para conocer su actitud y posición en todo momento. El barco 1 incorpora una IMU GPS/INS modelo VN-200 de VectorNav y el barco 2 una GPS/INS IMU-F180 de CodaOctopus. Dependiendo de las pruebas que se deseen llevar a cabo se incluyen en los USV otros sensores como sondas de profundidad, radar, etc. pero en el experimento descrito no portan ningún sensor de entorno. El timón de los barcos es actuado con motores paso a paso (con encoder y reductora) AS1050 y AS1060 de Beckhoff respectivamente. Los USV son controlados con sendos PCs Industriales Beckhoff C6920 equipados con el sistema de control

en tiempo real TwinCAT. Se han programado con un Control capaz de seguir de forma autónoma trayectorias especificadas por el Planificador del Centro de Control de Tierra y navegar siguiendo una formación determinada. Por lo tanto, disponen del software de control necesario para empezar a realizar maniobras de arrastre de barreras.

El sistema de comunicaciones de los USV con el CCT, y entre los diferentes equipos que conforman del CCT, está soportado por una red wifi que utiliza antenas Ubiquiti en la banda de 2.4 GHz de 1 W de potencia. Las antenas de los barcos son el modelo omnidireccional PicoStation M y la situada en tierra es el modelo sectorial NaoStation M2. Su cobertura teórica es de 5 Km, aunque nuestra experiencia es que su alcance sin pérdida de datos está entre 1.5 y 2 km³. En la figura 7 se pueden ver ambos modelos de antenas. En el experimento, que consiste en programar una maniobra de seguimiento, se ha asignado al USV1 como líder y al USV2 como seguidor. Se ha escogido esta maniobra porque involucra a los dos vehículos con un gran acoplamiento entre ellos. De este modo se muestra la interacción existente entre los dos SMCs para notificar/autorizar la misión a cada uno de los operadores y el papel que tienen cada uno de los módulos del CCT. En la figura 7 se representa la configuración del Centro de Control, con dos PCs para la monitorización y control de los vehículos: el SMC1 se ocupa del control del USV1, y el SMC2 del USV2 y ambos SMCs de la monitorización de los dos barcos. Además, durante este experimento, el SMC1 incorpora también el Servicio de Comunicaciones, por lo que no es necesario incluir un PC adicional. Para que los barcos realicen una misión de seguimiento, se han programado en el Control embarcado de los USV los métodos de guiado descritos en (Lapierre and Soetanto, 2007) y (Park et al., 2007), y un nuevo método de guiado y control, combinación de ambos, que sólo requiere un único e intuitivo parámetro de sintonía recogido en (de la Cruz et al., 2014, 2015, 2016). Así, cuando se comanda una misión de seguimiento a los vehículos, se les envía junto con la misión a realizar el método de guiado y los parámetros necesarios para realizarla. Estos parámetros pueden ser cambiados mientras se realiza la maniobra, de modo que puede ajustarse su comportamiento en tiempo real.

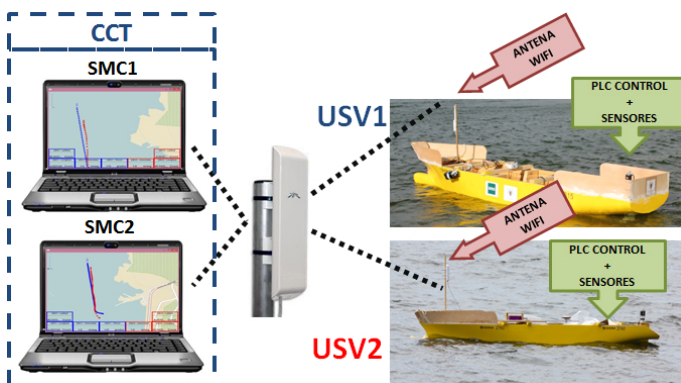


Figura 7: Configuración del CCT en el experimento

Para generar una misión de seguimiento se intercambia la serie de mensajes esquematizados en la figura 8. En ella se muestran las señales que envía/recibe cada SMC al/del Servicio de Comunicaciones (SC). Si un SMC quiere enviar una señal a un USV debe enviarla al SC a través de su Comandador. Todas las señales de la figura 8 se muestran en el orden en que se generan, salvo aquellas que ocurren simultáneamente, que son representadas de forma sucesiva por claridad. Se pueden dar dos casos:

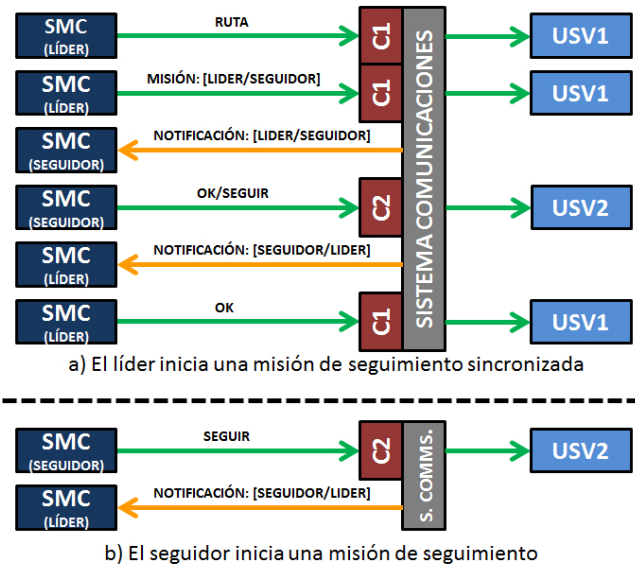


Figura 8: Protocolo para establecer una misión de seguimiento

a) El líder crea la misión de seguimiento. En este caso se procura que el comienzo de la maniobra esté sincronizada. El líder, en el experimento el USV1, se encarga de definir qué ruta quiere hacer e indicar al seguidor, el USV2, que le siga con unos parámetros de configuración determinados. En la figura 8 a) se muestran los mensajes más importantes intercambiados entre los dos SMC para realizar esta misión. Veámoslo con más detalle:

- 1) El SMC1 decide que su barco será el líder de una maniobra de seguimiento, por lo tanto lo primero que hace es planificar qué trayectoria va a realizar el USV1. Para ello marca los puntos de paso en el mapa (también podría utilizar trayectorias predefinidas previamente o curvas paramétricas) y su planificador calcula y visualiza la trayectoria que se genera. Si el operador está de acuerdo con la ruta obtenida se la envía a su barco, el USV1.
- 2) El SMC1, en lugar de enviar una señal de comienzo de la ruta, indica al barco que es una misión de seguimiento iniciada por el líder. Al ser una operación sincronizada, implica dos acciones: el USV1 queda a la espera de la señal de inicio y el Servicio de Comunicaciones le envía al SMC del barco seguidor, el USV2, la solicitud de que le siga.
- 3) El SMC2 recibe la notificación y los parámetros de seguimiento, el operador podrá aceptarla o denegarla, y se informará al líder de lo decidido por el operador.

³Cuando sea preciso alcances mayores se tiene previsto sustituir el sistema de comunicaciones de los barcos por un enlace radio, para ello se modificarán las rutinas correspondientes en el Servicio de Comunicaciones y de los clientes de los vehículos.

- 4) Si el operador del SMC2 decide continuar con la misión solicitada, enviará a su barco, el USV2, la notificación de seguir al USV1 con los parámetros que ha recibido.
 - 5) El SMC1, como líder, recibe una notificación de que el seguidor comienza la maniobra.
 - 6) Como esta operación es sincronizada, el líder debe indicar al USV1 que comience a seguir la ruta que había recibido previamente.
- b) El seguidor inicia una misión de seguimiento. En este caso la operación de seguimiento no está sincronizada con el líder, por lo que el líder está realizando un movimiento independientemente de lo que haga el seguidor. En la figura 8 b) se muestra el flujo de las señales más importantes que se intercambian:
- 1) El seguidor, el SMC2, envía una orden a su vehículo, el USV2, para que siga a otro vehículo, el USV1.
 - 2) El Servicio de Comunicaciones, además de enviar la orden al barco USV2, envía una notificación al líder, en nuestro caso monitorizado y controlado desde el SMC1. Este mensaje es para informar al operador del USV1, pero no se espera ninguna actuación por su parte.

El flujo de datos de estos experimentos puede seguirse también en la figura 5, en la que se puede observar con más detalle la composición de mensajes y comandos realizados en cada uno de los pasos, así como el protocolo de comunicaciones utilizado y el módulo encargado de agregar cada parte del mensaje, siguiendo cada flecha que representa un mensaje el mismo código de colores. Por ejemplo en el caso del primer mensaje de la figura 8.a) podemos observar que la ruta es enviada por medio del Comandador correspondiente al USV1. Si dirigimos nuestra atención a la figura 5 veremos que el Planificador genera un fichero Ruta a partir de los datos de entrada que se recogen en la Interfaz de Usuario, posteriormente el fichero Ruta junto con las instrucciones del operador son enviados al comandante, que agregará los comandos necesarios (en este caso, comandos de alto nivel que formarán una ruta), los empaquetará junto a los datos necesarios para formar el fichero Ruta y lo enviará al Servidor Central que se encargará de encapsularlos y enviarlos en el formato correcto al USV1. En el experimento realizado se utiliza la opción b): el líder está realizando una serie de maniobras y el seguidor comienza a seguirle. La telemetría de ambos barcos es recibida por el SC que la remite a los dos SMC puesto que además de controlar su USV pueden monitorizar al otro. Además, el SC transmite la posición del barco líder al barco seguidor.

En la figura 9 se muestra el movimiento realizado por ambos barcos una vez finalizado el experimento, que consiste en el movimiento del USV1 mientras que el USV2 le sigue. Las maniobras realizadas por el USV1 se han marcado en cuatro tramos de su recorrido: (1) un control manual por el SMC1, (2) ejecución de ruta planificada, (3) cambio a otra ruta planificada antes de finalizar la anterior, (4) paso a control manual después de finalizar la ruta planificada. Las rutas planificadas, por simplicidad, son dos líneas rectas (marcadas en la figura con líneas verdes). El USV2 se pone en modo seguidor cuando el USV1 está en el tramo (1), para ello se le indica que siga al USV1 a una cierta distancia y ángulo de vista. Durante el seguimiento, los tramos (2) y (3), el operador que controla el USV2 (el SMC2) va cambiando los parámetros de seguimiento

(la distancia y/o el ángulo de vista respecto al líder). En el tramo (3) se han marcado como ejemplo de la posición del líder (el USV1, cuadro azul) y del seguidor (el USV2, cuadro rojo) en dos instantes distintos con dos ángulos de vista y distancias diferentes. Finalmente, cuando el USV1 se encuentra en el tramo (4), se le manda detenerse al USV2. Para evitar que los USV colisionen entre sí, se ha incluido en el algoritmo de control un sistema de esquiwa de obstáculos basado en (Lalish and Morgansen, 2008). Actualmente la información sobre posibles obstáculos en la trayectoria de los barcos es enviada por el CCT, incluida la posición de los otros vehículos (no existe comunicación entre ellos). Está contemplado instalar dos sensores en los USV para que sean capaces de analizar el entorno y así obtener la posición de los obstáculos para que operen de un modo más autónomo, pero el funcionamiento del sistema de esquiwa de obstáculos es independiente de cómo se obtenga la posición de los objetos próximos al USV. Se utilizarán un lidar para detección cercana de obstáculos (hasta 40 metros de alcance), y un radar para detección a media y larga distancia de obstáculos (a partir de los 40 metros). En caso de que entre en funcionamiento el sistema de esquiwa de obstáculos, cuando finalice la maniobra para la evasión se procederá, por parte del planificador y en caso necesario, a realizar una re-planificación de la ruta.

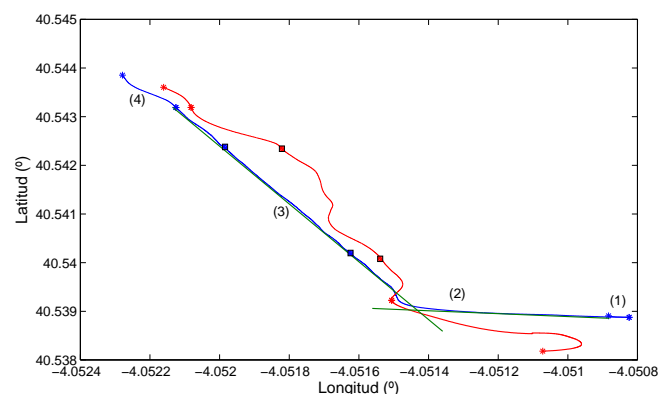


Figura 9: Trayectoria de los barcos: seguimiento del USV2 (rojo) al USV1 (azul)

Por último, en la figura 10 se muestran diversas pantallas del Interfaz de Usuario del SMC1 en un momento intermedio de la misión de seguimiento. Estas pantallas son utilizadas en distintos instantes de la operación, pero en esta figura se presentan juntas como ejemplo de algunas de las operaciones mencionadas anteriormente. En concreto, se muestra la ventana que monitoriza ambos USV en el SMC1, en la que se representa la trayectoria seguida por ambos USV y algunas de las variables que el operador ha decidido mostrar en primer plano en modo transparente para que no impidan ver el mapa de fondo. Además, se muestra la evolución temporal de la velocidad del USV1 y de la acción de control aplicada a la hélice (seleccionada entre un amplio conjunto de variables del vehículo que se han definido previamente como registrables) y que el operador ha decidido mostrar durante la misión para examinar, por ejemplo, si el controlador diseñado es adecuado. También se puede ver la pantalla del Comandador (del barco que puede controlar, el USV1) y la ventana que acepta la ruta planificada y la envía.

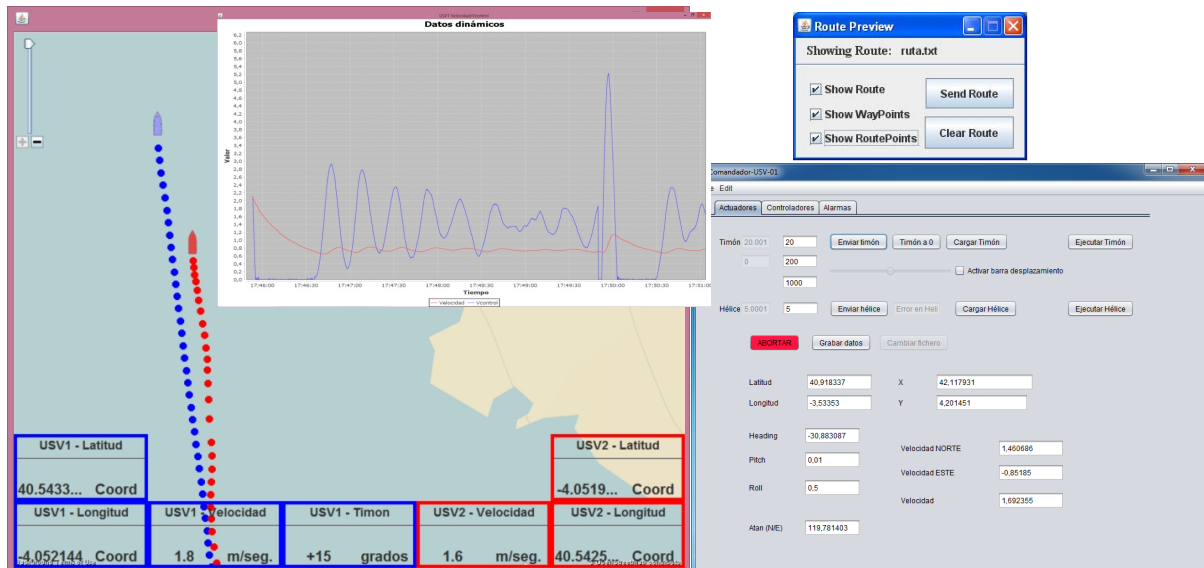


Figura 10: Ejemplo de ventanas utilizadas en el SMC1 durante el experimento

5. Conclusiones

Dentro del proyecto SALACOM se ha diseñado y desarrollado un Centro de Control de Tierra que permite la coordinación de vehículos heterogéneos e incorpora al operador en la misión. El Centro de Control es reconfigurable en tres aspectos: la monitorización de los vehículos, el control y la definición de las alarmas y la asignación de los operadores que gestionan cada vehículo. De este modo, el Centro de Control permite comunicar y reorganizar los operadores de los vehículos (los Sistemas de Monitorización y Control, SMC) en distintos equipos informáticos manteniendo a los operadores en el lazo de control. El Servicio de Comunicaciones desarrollado en el Centro de Control es el encargado de gestionar todos los SMC y abstraer todos los elementos de bajo nivel de las comunicaciones, haciendo que sean transparentes para el operador y favoreciendo la reorganización de todos los elementos. Esto permite que un operador controle diversos vehículos, pero si la carga de trabajo es grande ceder el control de los vehículos a otros operadores en tiempo real. La estructura principal del Centro de Control de Tierra está desarrollada, pero se sigue trabajando para mejorar sus prestaciones. Por ejemplo, se está modificando el Interfaz de Usuario para que el SMC pueda adaptarse dinámicamente de forma automática a la misión, preferencias y carga de trabajo del operador (Bonache Seco et al., 2016). También se está trabajando en fusionar las medidas, tanto de estado (Besada-Portas et al., 2011) como de entorno (Besada-Portas et al., 2002), de los vehículos para obtener una estimación más precisa y completa⁴.

⁴Actualmente los datos sensoriales de los vehículos se utilizan para detectar potenciales obstáculos en su trayectoria, notificar la alarma correspondiente o actuar de forma reactiva en el caso de colisión inminente. La fusión de la información sensorial de los diversos vehículos podrá ser retransmitida a los vehículos aumentando su capacidad.

Agradecimientos

Los autores del artículo quieren agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad español su apoyo a través del proyecto SALACOM (DPI2013-46665-C2-1-R).

Referencias

- ASTM, 2017. Committee F41 on unmanned maritime vehicle systems (umvs). [Online] <https://www.astm.org/COMMITTEE/F41.htm>.
- ASV, 2017. Asview control system. [Online] <http://asvglobal.com/asview-control-system/>.
- Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., Besada, J., Jesus, M., 2011. Multisensor fusion for linear control systems with asynchronous, out-of-sequence and erroneous data. *Automatica* 47 (7), 1399–1408.
- Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., de la Cruz, J., 2002. Unified fusion system based on bayesian networks for autonomous mobile robots. In: *Information Fusion, 2002. Proceedings of the Fifth International Conference on*. Vol. 2. IEEE, pp. 873–880.
- Bonache Seco, J. A., López Orozco, J. A., Besada Portas, E., de la Cruz, J. M., 2016. Centro de control versátil: Estado actual y evolución hacia la adaptabilidad. *CEA*, pp. 979–986.
- Bürkle, A., Segor, F., Kollmann, M., Schönbein, R., 2011. Universal ground control station for heterogeneous sensors. *Journal On Advances in Telecommunications, IARIA* 3 (3), 152–161.
- Burmeister, H.-C., Bruhn, W., Rødseth, Ø. J., Porathe, T., 2014. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-navigation implementation: The munin perspective. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 1, 1–13.
- Cummings, M. L., How, J. P., Whitten, A., Toupet, O., 2012. The impact of human-automation collaboration in decentralized multiple unmanned vehicle control. *Proceedings of the IEEE* 100 (3), 660–671.
- de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, A. J., Besada Portas, E., Aranda Almansa, J., 2016. Control de formaciones de vehículos marinos de superficie con restricciones de entrada. *CEA*, pp. 1044–1051.
- de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, A. J., Besada Portas, E., Moreno Salinas, D., Aranda Almansa, J., 2014. Seguimiento de caminos para formaciones de vehículos marinos de superficie.
- de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, J. A., Besada-Portas, E., Aranda-Almansa, J., 2015. A streamlined nonlinear path following kinematic controller. In: 2015

- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, pp. 6394–6401.
- Heo, J., Kim, S., Kwon, Y., 2016. Design of ground control station for operation of multiple combat entities. *Journal of Computer and Communications* 4, 66–71.
- Lalish, E., Morgansen, K. A., 2008. Decentralized reactive collision avoidance for multivehicle systems. In: *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, pp. 1218–1224.
- Lapierre, L., Soetanto, D., 2007. Nonlinear path-following control of an auv. *Ocean engineering* 34 (11), 1734–1744.
- LibrePilot, 2015. Software suite to control multicopter and other rc-models. [Online] <https://www.librepilot.org/site/index.html>, accedido en marzo de 2017.
- Lindemuth, M., Murphy, R., Steimle, E., Armitage, W., Dreger, K., Elliot, T., Hall, M., Kalyadin, D., Kramer, J., Palankar, M., et al., 2011. Sea robot-assisted inspection. *IEEE robotics & automation magazine* 18 (2), 96–107.
- MAVLINK, 2017. Micro air vehicle communication protocol. [Online] <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>, accedido en Marzo, 2017.
- mdCOCKPIT, 2017. mdcockpit windows desktop software for microdrones uavs. [Online] <https://www.microdrones.com/en/mdaircraft/software/mdcockpit/>, accedido en Marzo, 2017.
- Moreno-Salinas, D., Besada-Portas, E., López-Orozco, J., Chaos, D., de la Cruz, J., Aranda, J., 2015. Symbolic regression for marine vehicles identification. *IFAC-PapersOnLine* 48 (16), 210–216.
- Mupparapu, S. S., Chappell, S. G., Komerska, R. J., Blidberg, D. R., Nitzel, R., Benton, C., Popa, D. O., Sanderson, A. C., 2004. Autonomous systems monitoring and control (asmac)-an auv fleet controller. In: *Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES*. IEEE, pp. 119–126.
- Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., Pratt, K., 2008. Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane wilma. *Journal of Field Robotics* 25 (3), 164–180.
- Park, S., Deyst, J., How, J. P., 2007. Performance and lyapunov stability of a nonlinear path following guidance method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 30 (6), 1718–1728.
- Patterson, M. C., Mulligan, A., Boiteux, F., 2013. Safety and security applications for micro-unmanned surface vessels. In: *2013 OCEANS-San Diego*. IEEE, pp. 1–6.
- QGroundControl, 2017. A uav control station. [Online] <http://qgroundcontrol.com/>, accedido en Marzo de 2017.
- Ribas, D., Palomeras, N., Ridaio, P., Carreras, M., Mallios, A., 2012. Girona 500 auv: From survey to intervention. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics* 17 (1), 46–53.
- STANAG4586, 2012. Standard interfaces of uav control system (ucs) for nato uav interoperability, ed. 3. NATO standardization agency (nsa). [Online] <http://nso.nato.int/nso/nsdd/listpromulg.html>.
- Sutton, R., Sharma, S., Xiao, T., 2011. Adaptive navigation systems for an unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Engineering & Technology* 10 (3), 3–20.
- Walter, B. E., Knutzon, J. S., Sannier, A. V., Oliver, J. H., 2004. Virtual uav ground control station. In: *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit*.
- WGSM, 2017. Wave glider management system. [Online] <https://www.liquid-robotics.com/platform/software/>.