

Arquitectura de Control Modular y Escalable para la Navegación de Sistemas Autónomos No Tripulados

Págs. 111-121

*Francisco J. Lastra^a Jesús Trujillo^b Francisco J. Velasco^a Elías Revestido Herrero^a Luis M. Vega^c
Enrique Rodríguez^c*

^aDepartamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Náutica - Santander (Cantabria), Spain. lastrafj@unican.es, velascof@unican.es, revestidoe@unican.es

^bIberalter, Madrid, Spain. jesus.trujillo@iberalter.es

^cDepartamento de Construcciones navales y técnicas de la navegación, Universidad de Cantabria. Escuela Técnica Superior de Náutica - Santander (Cantabria), Spain. vegalm@unican.es, enrique_r.m@hotmail.com

Resumen

En el presente artículo se propone una arquitectura híbrida basada en sistemas multiagente para el desarrollo de aplicaciones de inspección de cables submarinos. La elevada complejidad operativa imposibilita la utilización de arquitecturas de control estándar, por tanto, se ha desarrollado una arquitectura de control ad-hoc con características de modularidad y escalabilidad. También se ha desarrollado una metodología para la generación y el seguimiento de la trayectoria en el interior de un espacio virtual fiable, sobre el cual, la navegación se realiza bajo condiciones operativas de mayor seguridad y efectividad.

Palabras Clave

UUV, arquitectura de Control Distribuida, modularidad, escalabilidad, sistemas supervisores.

Abstract

In this paper a hybrid architecture based on multi-agent systems to develop underwater cables inspection applications is proposed. The high operational complexity does not allow the use of standard control architectures, therefore, it has been developed an ad-hoc control architecture with modularity and scalability characteristics. It has also been developed a methodology for generation and monitoring of a path within a reliable virtual space, on which the navigation is performed under conditions of greater operational safety and effectiveness.

Keywords

UUV, Distributed Control architecture, modularity, scalability, supervisory systems.

Fecha de recepción: Junio de 2015

Fecha de aceptación: Agosto de 2015

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de sistemas robóticos en el entorno submarino es altamente compleja, debido principalmente al carácter variable e imprevisible sobre el que se desarrollan las diferentes actividades. Una de estas aplicaciones, es la inspección de cables submarinos en presencia de corrientes submarinas.

Los sistemas de inspección de cables submarinos han ido evolucionando junto con el desarrollo de los sistemas robóticos submarinos. La tendencia operativa convencional, ha evolucionado a partir de la inspección visual de los cables submarinos por parte de buzos especializados, siendo una operativa peligrosa, ya que se encuentran expuestos a los peligros propios de las altas profundidades, hasta la utilización de vehículos submarinos para la supervisión de los cables por parte de un operador humano, de manera que el vehículo submarino desarrolla tareas básicamente de localización y de posicionamiento, con el fin de mejorar la inspección de los cables submarinos a través de los sistemas de visión submarina (estéreo-visión).

La inspección mediante sistemas autónomos no tripulados crece de manera progresiva, gracias al aumento en la autonomía de este tipo de vehículo. Entendiendo autonomía tanto desde el punto de vista energético, como en la toma de decisiones. Tareas cada más complejas, desarrolladas por este tipo de vehículos, implica el diseño y desarrollo de arquitecturas cada vez más complejas. La arquitectura de control modular y escalable, facilita el diseño de estos equipos, permitiendo la inserción fiable de diferentes sub-sistemas dentro del conjunto del vehículo (diferentes grupos de adquisición de datos, etc.).

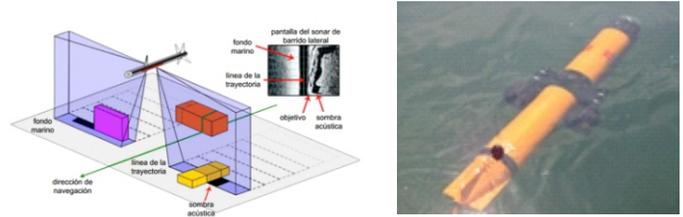


Figura 1. Aplicación Inspección mediante UUV.a. Escenario Operativo sistema sonar b. UUV propiedad Universidad de Cantabria para la inspección

Fuente: Tomado de

http://www.southwestcoastalgroup.org/cc_mon_sidescan.html

La arquitectura propuesta en el artículo parte del concepto convencional de arquitectura híbrida basada en capas, dividiendo el comportamiento del sistema en dos grandes grupos: un comportamiento reactivo, en el que el sistema deberá reaccionar de una forma automática ante un determinado evento, caso de los sistemas de evitación de obstáculos que deberán modificar la trayectoria del sistema de tal forma que se reduzca la posibilidad de un impacto, y un comportamiento deliberativo, en el que el sistema evalúa diferentes posibilidades determinando aquella más conveniente en cada situación, por ejemplo, la generación de trayectoria entre dos puntos dependiendo de los consumos, etc.

La plataforma utilizada es la plataforma multi-agente cooperativos (Woolridge,2002; Panait, 2005; Russel, 2003) la cual está compuesta por un conjunto de agentes que aportan los conceptos de modularidad y escalabilidad necesarios para este tipo de aplicaciones. La modularidad del sistema permite un aumento en la capacidad de intercambiabilidad y conectividad entre los módulos ausente de incompatibilidades y riesgos de comprensión entre los mismos. Mientras que la escalabilidad del sistema permite la reducción entre potenciales errores, propiciados por el cambio de nivel o

entorno.

También cabe destacar las restricciones temporales de funcionamiento de cada uno de los módulos de las diferentes capas, capaces de reducir los retrasos producidos por los intérpretes de los distintos niveles en el lanzamiento de interrupciones o subrutinas para distintos escenarios en el procesamiento de datos recibidos desde sensores.

Estos agentes aportan características tales como autonomía, reactividad, sociabilidad/cooperación, e iniciativa. Aportando al sistema características de modularidad, reduciendo la complejidad al trabajar con módulos y sub-módulos para una determinada aplicación. Además los sistemas distribuidos permiten la aparición del paralelismo ya que permiten la repartición de tareas, fiabilidad, comportamiento fiable ante fallos y flexible, se puede habilitar/deshabilitar de forma dinámica. En este tipo de sistemas se viene trabajando durante años, aumentando la complejidad de los mismos a medida que aumenta su autonomía.

2. PROBLEMA A RESOLVER

El objetivo del sistema propuesto es la inspección de cables submarinos mediante la utilización de sistemas autónomos no tripulados en entornos no estructurados. Para ello, el sistema debe de realizar el seguimiento del cable on-line, y evaluar los datos obtenidos por los medios de captación para determinar los defectos en el cable.

Cabe destacar la estructura interna de los cables submarinos que incorpora en su interior cables de acero impidiendo cambios bruscos en la dirección de alojamiento

en el lecho marino. En la siguiente figura se muestra tanto a la aplicación a la que se hace referencia en el artículo (Ver Figura 2).

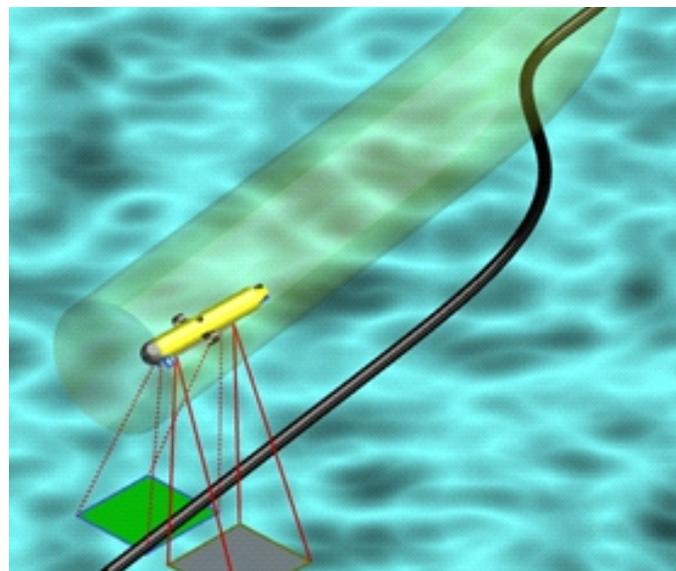


Figura 2. Aplicación de inspección de cables submarinos en el lecho marino

Fuente: (Lastra, 2015)

Actualmente, la Universidad de Cantabria dispone de varios vehículos marinos que componen el parque de vehículos del "Laboratorio de Experiencias Marinas de Cantabria" ubicado en la E.T.S. de Náutica de Santander. Para el desarrollo de esta aplicación se ha seleccionado el vehículo submarino C'Inspector (fig. 1.b), de la firma noruega Kongsberg. Este vehículo se ha modificado incorporando un conjunto de sonares de barrido lateral, capaces de aportar la información necesaria del fondo marino, a ambos lados del vehículo en la zona central y cuyo ancho nos permite detectar un ancho de aproximadamente 1 metro del lecho marino. Su localización en el vehículo fue estudiada al detalle con el fin de limitar su impacto en la maniobrabilidad del vehículo, ya que este vehículo se caracteriza por ser un vehículo de altas prestaciones, con gran versatilidad operativa gracias a su gran maniobrabilidad a alta velocidad.

El equipo consta de dos sistemas sonar independientes. Uno el sonar de navegación, cuya función es la obtención de una imagen sonar frontal del entorno utilizada para la detección de objetos frontales a diferentes distancias y de un conjunto side-scan sonar, encargado de proporcionar las imágenes a ambos lados del vehículo del lecho marino para su posterior estudio.

El estudio de las imágenes proporcionadas por los sonares se realiza de forma independiente mediante la utilización de técnicas de visión artificial. Mediante el estudio de la imagen frontal del entorno se podrá detectar los objetos con anterioridad, tanto dinámicos como estáticos, proporcionando una trayectoria al sistema fiable y segura. Mientras que el estudio de la imagen proveniente de los sonares laterales proporcionará la detección de diferentes objetos en el lecho marino, en dicho estudio se debe de tener en cuenta el estudio de las sombras acústica ya que nos proporcionará características propias de los objetos.

Como se ha comentado anteriormente los sonares de barrido lateral se encuentran adosados a la zona central del vehículo proporcionando información de los objetos dentro de la zona de detección determinada por el ángulo de detección del sonar. Esta zona de detección depende directamente de la profundidad, existiendo unos límites, tanto superior como inferior, para la detección segura del cable submarino.

Después de analizar y detectar el cable mediante las imágenes del sonar de barrido lateral se obtendrán los nuevos puntos de posición corroborando el correcto path determinado por el bloque de navegación (feedback). Por tanto, el vehículo navega a partir del desarrollo teórico de una trayectoria obtenido por el ajuste

de los puntos obtenidos del sonar mediante una función, es importante destacar la existencia de una íntima relación entre la generación de la trayectoria y los cambios bruscos de velocidad del equipo, ya que la generación de estos nuevos puntos es totalmente dependiente de la velocidad del equipo y por tanto, de la posición obtenida en cada iteración.

El análisis de estos cambios de velocidad proporcionará la aceptación o negación de los nuevos puntos por parte de los sistemas de supervisión de navegación del sistema.

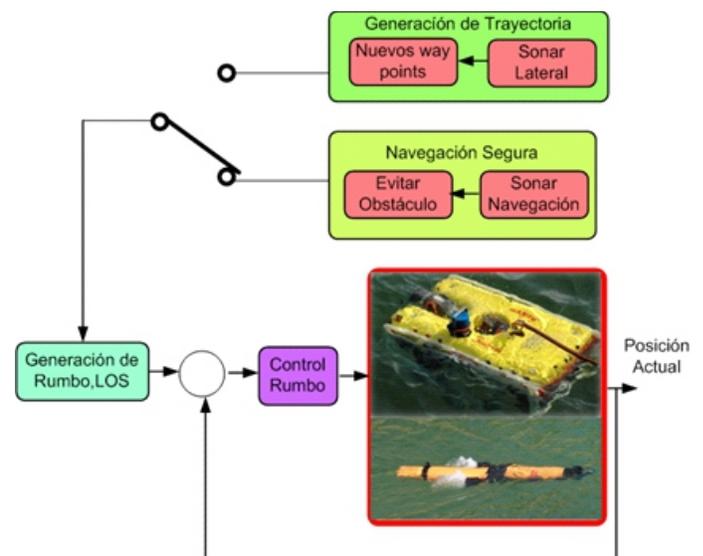


Figura 3. Arquitectura Básica de Control UUV

Fuente: (Lastra, 2015)

En la figura anterior (Ver Figura 3) se muestra el funcionamiento básico del sistema para una aplicación de inspección de los cables submarinos a partir de un sistema UUV con las características anteriormente indicadas.

Este funcionamiento básico se fundamenta en cuatro módulos claramente diferenciables. Un módulo de

generación de trayectorias para el seguimiento del cable submarino, capaz de desarrollar una ruta teórica anticipativa a partir de la generación de una función que aúne todos los puntos previamente obtenidos y obtenga los siguientes puntos de paso de la trayectoria (way-point's), un sistema de navegación segura, capaz de analizar y evitar cualquier objeto que se encuentre o pueda interceptar la trayectoria fijada por el anterior módulo, un sistema de decisión, basado en reglas ECA (event-condition-action) (Almeida, 2005), capaz de modificar el comportamiento del sistema, cambiando el modo de funcionamiento de navegación a navegación segura en el instante que el sistema de detección muestra un potencial peligro y por último, un sistema de seguimiento de la trayectoria (trackerpath), encargado de seguir fielmente cada uno de los puntos de paso determinados por los dos módulos de navegación reduciendo el error transversal de camino entre los diferentes puntos que conforman la trayectoria.

3. ARQUITECTURA PROPUESTA

A partir de la arquitectura básica anteriormente indicada se ha desarrollado una arquitectura más compleja (Ver Figura 4) basada en el framework multi-agent systems.

En dicha figura se puede observar los diferentes módulos enmarcados dentro de cada capa y sus agentes correspondientes. Existen diferentes clases de agentes encargados de diferentes tareas, un grupo de ellos están encargados de la adquisición de los datos del entorno y del posicionamiento del vehículo en su entorno, otros del comportamiento del mismo ante distintas situaciones, y por último, el grupo que aporta cohesión a los diferentes módulos, los agentes supervisores, cuya

funcionalidad es cohesionar todos los grupos, planificando y controlando los diferentes bloques, los agentes verificadores, encargados de comprobar la fiabilidad de los bloques y los datos reduciendo los retrasos derivados de los diferentes lenguajes formales de las capas en las que se ha dividido el sistema.

Para el correcto funcionamiento del sistema se ha incluido un bloque de control de los agentes, el cual habilita/deshabilita los mismos dependiendo del comportamiento global del sistema. Esto es, modifica el comportamiento del bloque supervisor (Ramadge, 1987) con el fin de evitar comportamientos indeseados. Un claro ejemplo es la deshabilitación del bloque de navegación cuando el vehículo se encuentra dentro del bloque de evitación de obstáculos.

Si descendemos un poco más en el desarrollo del sistema se encuentran los diferentes bloques, y subbloques en los cuáles se ha dividido el sistema. Como se ha comentado anteriormente, la arquitectura propuesta está dispuesta en capas, por tanto, se deben de ubicar estos módulos en su capa correspondiente.

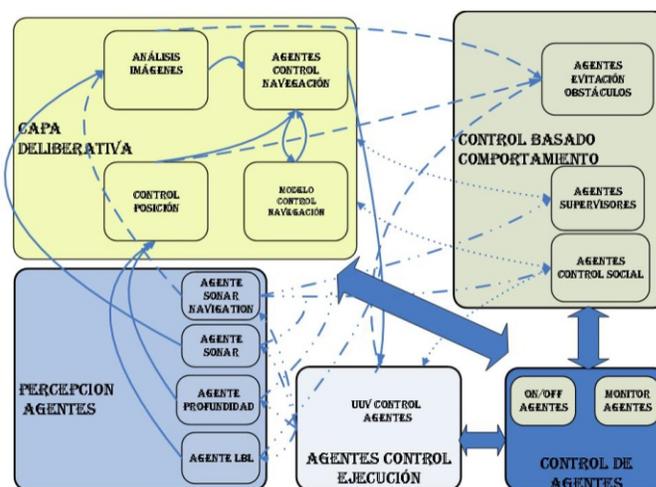


Figura 4. Arquitectura Multi-agente propuesta

Fuente: (Lastra, 2015)

Dentro de la capa deliberativa se dispone de los módulos de navegación, de pérdida del cable, y dentro de la capa reactiva, encontraremos los módulos de evitación de obstáculos y de seguimiento de la trayectoria entre cada punto determinado por el módulo de navegación.

El Módulo de Adquisición y Procesamiento de las Imágenes sonar es común a ambas capas, ya que los datos obtenidos por el sonar de barrido lateral es usado en la capa deliberativa, mientras el sonar de navegación se nutre de los datos propios del sonar de navegación.

Se incorporan por tanto, sistemas de verificación formales que permiten el desarrollo de las diferentes actividades junto con sus restricciones temporales, y se establecen supervisores zonales para evitar la aparición de datos incorrectos, tales como datos obtenidos fuera de tiempo con lo que el sistema se ve abocado al colapso. Para evitar algunos de estos problemas se están desarrollando sistemas software redundantes con el fin de obtener siempre datos fiables aunque no sean los óptimos para cada uno de los algoritmos evitando así paradas inesperadas de los módulos debidos a la carencia de datos.

El sistema se compone de cinco módulos principales. Las restricciones temporales de los módulos son diferentes, mientras que unos trabajan en tiempo real como es el Módulo de ejecución, otros sistemas se encuentran latentes esperando su habilitación a partir de un evento determinado, caso de este último tipo son los Módulos de Evitación de Obstáculos y el Módulo de Pérdida del Cable.

A continuación se explica de forma somera cada uno de los módulos del sistema. Cada módulo a su vez se encuentra dividido en sub-módulos, mostrándose así el flujo de datos dentro de cada uno.

a. Módulo de Navegación

Es el encargado de generar una trayectoria fiable y segura para el vehículo. En el módulo de adquisición y procesado de las imágenes del sonar de barrido lateral se obtiene la posición del cable y se traslada su posición al eje de coordenadas mundo. El sistema genera una trayectoria a partir de los puntos obtenidos en las etapas anteriores, para ello, se aproximan los datos obtenidos a una función, dicha función es totalmente dependiente de la velocidad del vehículo. Cabe destacar, que el sistema de decisión no sigue la trayectoria definida cuando existe una variación grande de velocidad, ya que estas funciones son totalmente dependientes de la velocidad. A partir de la función se obtiene la zona de detección de los objetos de forma segura, siendo esta zona los límites de la trayectoria suavizada del vehículo submarino (ec.1 y Figura 5).

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i N_{i,j}(t) \quad (1)$$

Siendo P_i los vértices y

$$N_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{en el resto casos} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,j}(t) = \frac{(t-x_i)N_{i,j-1}(t)}{x_{i+j-1}} + \frac{(x_{i+j}-t)N_{i+1,j-1}(t)}{x_{i+j}-x_{j+1}} \quad (3)$$

A partir de esta área, se puede obtener un volumen de funcionamiento del sistema seguro (Ver Figura 6),

únicamente solapando las diferentes capas limitadas por la profundidad y una precisa caracterización de los objetos del lecho marino.

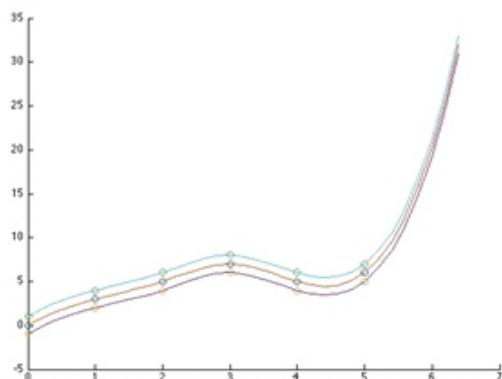


Figura 5. Área de detección (zona comprendida entre líneas azul-morada) y path teórico (línea roja)
Fuente: (Lastra, 2015)

b. Módulo de Adquisición y Procesado imágenes sonar

Sirve de alimentadores de los bloques de navegación y de evitación de obstáculos. Mediante el estudio de las imágenes propias del sonar de barrido lateral se determina la posición del cable en el lecho marino. Con el estudio de las imágenes provenientes del sonar de navegación se determina la posición de los objetos estáticos, tales como rocas, y se estudia la trayectoria de los objetos dinámicos, para ello, una vez detectados se estudia de forma pormenorizada una determinada zona de la imagen, aquella que es de interés para los diferentes módulos. Si un objeto dinámico es detectado, se estudia su trayectoria aproximando sus puntos a una determinada función, una vez obtenida dicha curva se evalúa buscando su posición en un horizonte conocido, con el fin de obtener un posible impacto, determinando el tiempo de evitación del mismo.

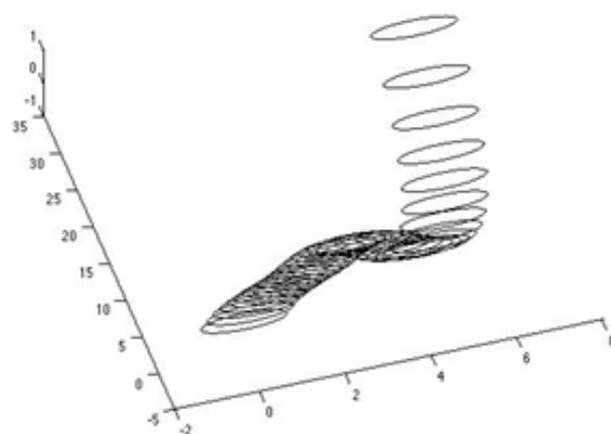


Figura 6. Volumen path seguro
Fuente: (Lastra, 2015)

c. Módulo de Evitación de Obstáculos

Se define una trayectoria fiable ante un potencial impacto del vehículo, determinado por la trayectoria proporcionada por el Módulo de Navegación y cualquier objeto que se encuentre en la zona frontal del vehículo. En el instante en el que se detecte la posición de un objeto, debido a que el método de detección es estático no se determina si el tipo de objeto es estático o dinámico, el sistema debe de determinar el tipo de objeto y por tanto, las acciones a determinar. Si el sistema es estático su localización quedará determinada desde el primer instante, y únicamente se deberá determinar si existe colisión o no según la trayectoria del vehículo. En el caso que sea un objeto dinámico, las posiciones relativas entre imágenes han cambiado, se debe detectar su trayectoria y determinar un punto de corte con la del vehículo en un horizonte cercano. Una vez determinado se modifica la trayectoria del vehículo, enviando estas nuevas posiciones al Módulo de Ejecución.

d. Módulo de Pérdida Cable

Una vez se ha producido una pérdida del cable en un instante, el sistema carga de nuevo la última posición conocida estableciendo una trayectoria segura a este nuevo punto, una vez alcanzada la misma el algoritmo de búsqueda establece un conjunto de trayectoria de forma cónica, partiendo desde el punto último conocido hacia la zona teórica determinada por el módulo de navegación. Una vez determinado el cable de nuevo, el sistema borra el conjunto de puntos correspondientes a la anterior trayectoria y comienza de nuevo el ciclo. En caso de no encontrar el cable el vehículo submarino asciende y transmite la última posición conocida a la estación de control.

e. Módulo de Ejecución

Este módulo está compuesto por otros dos módulos. Un módulo de toma de decisiones, en el cual se determina la acción a realizar en cada instante. Este bloque es dependiente del comportamiento del sistema, ya que es un sistema basado en eventos. Si se produce una identificación de un objeto por parte del módulo de evitación, la trayectoria viene determinada por el conjunto de puntos obtenidos de dicho bloque hasta que se ha superado el objeto, en este instante de nuevo toma el control el Módulo de Navegación. El otro sub-módulo es el correspondiente al algoritmo de seguimiento de ruta, el LOS modificado (Ver Figura 7), cuya función es la reducción del error transversal de camino entre cada uno de los puntos obtenidos en los Módulos de Navegación y el Módulo de Evitación de Obstáculos.

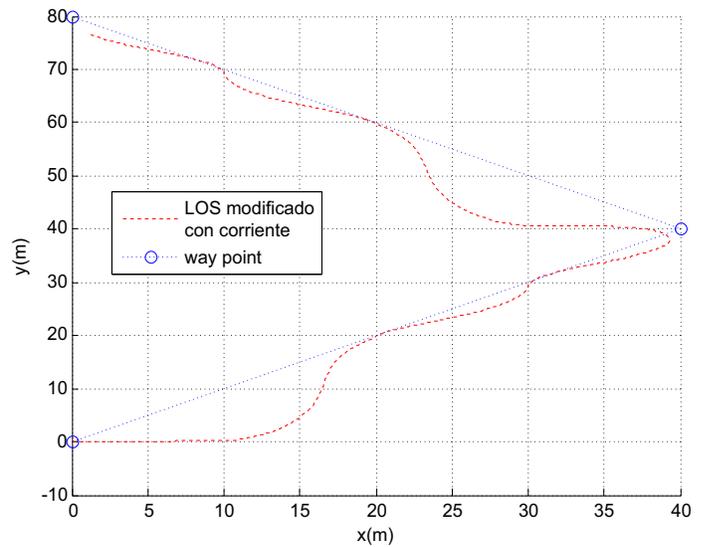


Figura 7. LOS modificado con Corrientes
Fuente: (Lastra, 2015)

4. SIMULACIÓN

Para la simulación correspondiente a este apartado del artículo se ha utilizado la plataforma de desarrollo de Matlab/Simulink, siendo necesarias diferentes toolbox para el desarrollo de las mismas. Mediante la toolbox Statecharts se ha construido la máquina de estados finita para la ejecución del módulo de navegación y su posterior simulación.

Para la simulación los Módulos de Navegación y de Ejecución se ha utilizado el modelo hidrodinámico (Fossen, 1994, 2002) del vehículo C'Inspector desarrollado a partir del trabajo de Velasco (2013).

En base al comportamiento discreto del Módulo de Adquisición y Procesado de la Imagen del Sonar de Barrido Lateral, se obtiene una función continua correspondiente a la trayectoria teórica del cable y es ésta, la que se utilizará para generar el path al vehículo submarino.

Uno de los requerimientos del sistema es la aportación de los dos primeros puntos, en este instante, la trayectoria se ajusta a una recta (punto de mayor error), como se puede comprobar en la figura la dinámica del submarino provoca una salida temporal de la zona de detección, una potencial solución a este problema sería situar al vehículo con un primer rumbo predeterminado.

A partir de aquí, se van obteniendo diferentes puntos. Todos estos puntos de paso son los puntos correspondientes a una curva que es la trayectoria teórica del cable. Una vez se posee la curva característica del cable, se crea el área de detección fiable. Cualquier posición dentro de esta área permitirá al vehículo captar el cable.

Se observa en la figura 8, como el Módulo de Ejecución del Sistema mantiene la trayectoria del vehículo siempre dentro del área de detección, por lo tanto el cable permanece en el área de detección.

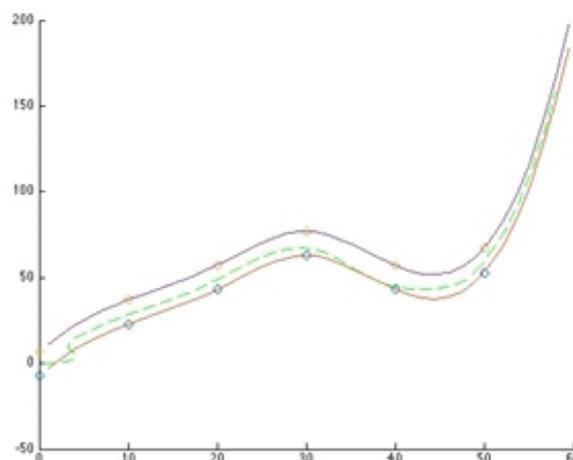


Figura 8. Área de Detección y trayectoria simulada Vehículo C'Inspector

Fuente: Tomado de Matlab

Una vez determinado el área de detección fiable, para una determina profundidad, se podrá definir el volumen de detección fiable si se superponen todas las posibles capas obtenidas desde la posición inferior, punto donde no se pueden perfilar correctamente los límites del objeto, y la posición superior, siendo ésta el lugar donde no se puede detectar el cable o el estudio de las sombras no es concluyente.

Por tanto, la trayectoria del vehículo se deberá de encontrar en el interior de este volumen para que la detección sea fiable. Como se puede comprobar en la figura 9, la trayectoria anteriormente indicada se encuentra inmersa dentro de esta zona, así que detecta el cable en todos los puntos de la misma.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha propuesto una arquitectura basada en un sistema multiagente. Esta arquitectura, permite dar respuesta a las restricciones actuales,

afectando tanto al tiempo como al seguimiento en la inspección de cables submarinos mediante la utilización de sistemas autónomos no tripulados.

La utilización de este tipo de vehículo en estos últimos años se debe al gran avance en la autonomía de los mismos, tanto desde un punto de vista energético como en capacidad de decisión.

La arquitectura de control se encuentra íntimamente ligada a la localización de los sistemas, en nuestro caso, la posición del sonar de barrido lateral condiciona el funcionamiento del sistema en su conjunto, evitando un seguimiento del cable desde su conocimiento

anticipado, determinando la posición teórica a alcanzar partiendo del conocimiento de todos los puntos anteriores. Una vez se determina una nueva posición, se crea el área de detección segura dependiente de la profundidad del conjunto cable-vehículo, y mediante el conocimiento de los límites superior e inferior de detección fiable, se obtiene el volumen de detección, lo que a priori permitirá el desarrollo de trayectoria fiables ya que no será necesario un posicionamiento tan exacto para la detección del cable. Mediante esta arquitectura propuesta, sumándole la metodología basada en la generación de un espacio virtual tubular, perseguimos, la reducción del tiempo de identificación y del seguimiento del objeto, además de conferir una operativa más fiable y segura.

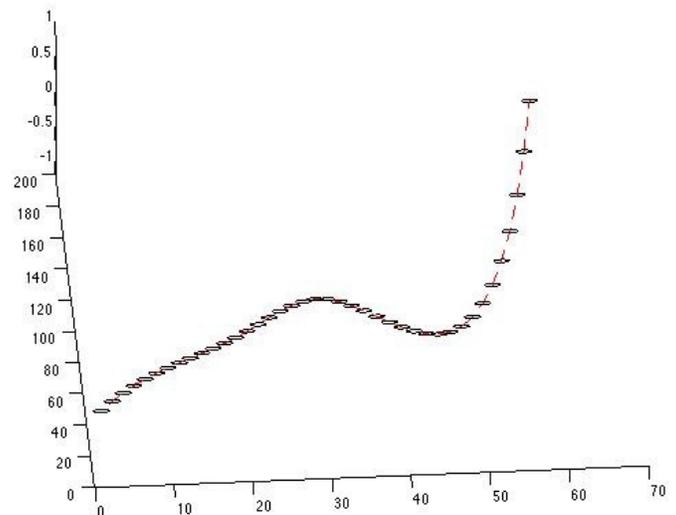
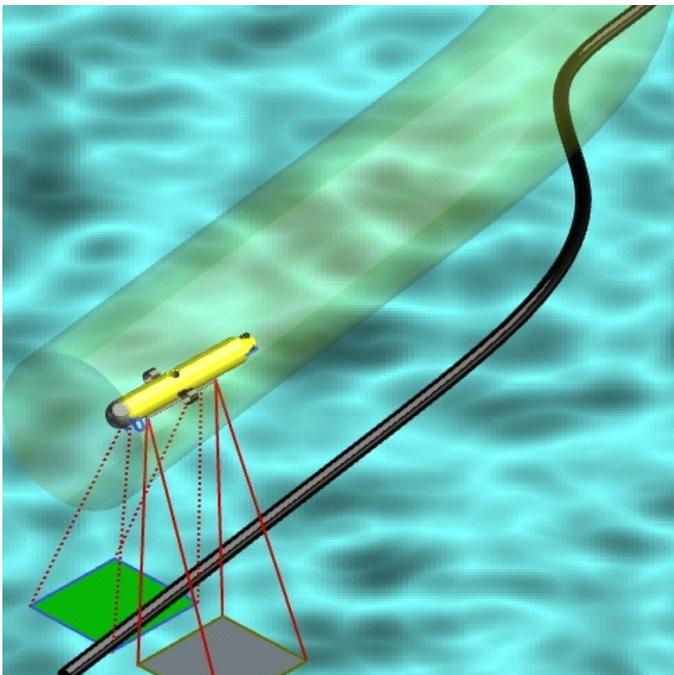


Figura 9. Volumen de detección y trayectoria

Fuente: Tomado de Matlab

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO (DPI2011-27990) con fondos FEDER y por el Ministerio de Defensa, programa COINCIDENTE-1003211003100.

REFERENCIAS

- Almeida E., Luntz J. & Tilbury D. (2005). Modular finite state machines implemented as event-condition-action systems. Proceedings of the 16th IFAC World Congress.
- Fossen T.I. (2002). *Marine control Systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics AS. Trodheim, Norway.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and control of ocean vehicles*. New York, USA: John Wiley and Sons Ltd.
- Panait, Liviu; Luke, Sean (2005). "Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art" (PDF). *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*.
- Russell, Stuart J. & Norvig, Peter (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, ISBN 0-13-790395-2
- Ramadge P.J. Wonham W.M., (1987) Supervisory Control of a Class of Discrete event processes, in Analysis and Optimization of Systems, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences, A. Benso
- ussan and J. Lions, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1984, 63, 475–498. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0006306>
- Velasco F., Lastra F., Revestido E, Riola J. & Díaz J. Navegación de Vehículos Submarinos no Tripulados en Entornos no Estructurados. DESEi+D 2013
- Wooldridge, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons. ISBN - 0-471-49691 - X