

Planificación y control de la trayectoria de UUVs para seguimiento y alcance de un objetivo móvil

J.L. Aguirre Martínez¹, M. Saura Sánchez¹, G. Munuera Saura¹, A. Luaces Fernández²

P. Martínez Ibáñez¹, P. Segado Cabezos¹

¹Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica de Cartagena.

jose Luis.aguirre@upct.es ; msaura.sanchez@upct.es ; gregorio.munuera@upct.es;

pmibanez.i@gmail.com ; psegado.ct@gmail.com

²Lab. de Ingeniería Mecánica. Universidad de la Coruña. aluaces@udc.es

En este trabajo se presenta un algoritmo que planifica y controla la trayectoria de un vehículo submarino no tripulado o UUV (en inglés: Unmanned Underwater Vehicles) para permitirle alcanzar o seguir un objetivo móvil. El algoritmo desarrollado consta de dos módulos principales: el primero planifica la trayectoria y velocidad que debe mantener el vehículo para alcanzar el objetivo en las condiciones especificadas; el segundo realiza el control sobre los mandos del vehículo para que describa, con el menor error posible, la trayectoria marcada con la orientación y velocidad fijada. La eficacia del algoritmo se ha comprobado mediante simulaciones dinámicas de un modelo basado en los UUVs REMUS100 y NPS Aries.

1. Introducción

El desarrollo de vehículos submarinos no tripulados (UUVs) ha experimentado en los últimos años una importante expansión, en muchos casos, estos vehículos, se han convertido en un sustituto ideal del ser humano a la hora de llevar a cabo trabajos bajo el agua en los que existen condiciones extremas o peligrosas.

Actualmente se están realizando importantes esfuerzos con el fin de desarrollar sistemas que permitan a los UUVs cumplir misiones de forma autónoma, o que, ayuden al operador del vehículo en la navegación, para que éste pueda concentrarse en los objetivos principales del trabajo, y no en el guiado del vehículo.

La planificación y el control de una trayectoria que conduzca al vehículo a un objetivo es una de las tareas más importantes que se deben resolver a la hora de cumplir una determinada misión.

La planificación de trayectorias de los UUV presenta características particulares, frente a la de otros vehículos aéreos y terrestres, derivadas de las diferencias propias de los UUVs y del entorno. Una característica clave en vehículos sumergidos, es la falta de información fiable y el pequeño ancho de banda en las comunicaciones. Esto limita significativamente los métodos de planificación de trayectorias que se pueden utilizar. Debido a que no pueden existir comunicaciones fluidas entre diferentes sistemas sumergidos, la planificación de la ruta debe realizarse mediante algoritmos integrados en el sistema de control del propio vehículo, [6].

Tradicionalmente el esquema a seguir para realizar el control de una trayectoria se han dividido en: *Puntos de estabilización, seguimiento de trayectoria y ruta siguiente*. Más recientemente se ha introducido el concepto de *maniobra* como puente entre el *seguimiento de trayectoria* y la *ruta siguiente*. Para definir de la forma más adecuada, cada una de estas partes, es necesario conocer la maniobrabilidad del vehículo y tener la máxima información sobre la posición y movimiento del objetivo y del entorno [5].

En este artículo se describen los algoritmos creados para gobernar un UUV durante el seguimiento y alcance de un objetivo submarino en movimiento. Estos algoritmos se han implementado junto con los modelos de dos vehículos diferentes: el REMUS100 de Kongsberg (Noruega), [2] y el NPS Aries de Naval Postgraduate School (EUA), [3][4], de esta forma se ha podido simular el comportamiento que tendrían estos vehículos durante una maniobra de aproximación y alcance utilizando los algoritmos desarrollados.

El procedimiento de actuación del UUV durante la maniobra de seguimiento y alcance es el que se presenta en la figura 1. Los algoritmos desarrollados realizan las tareas representadas en el esquema con línea continua.

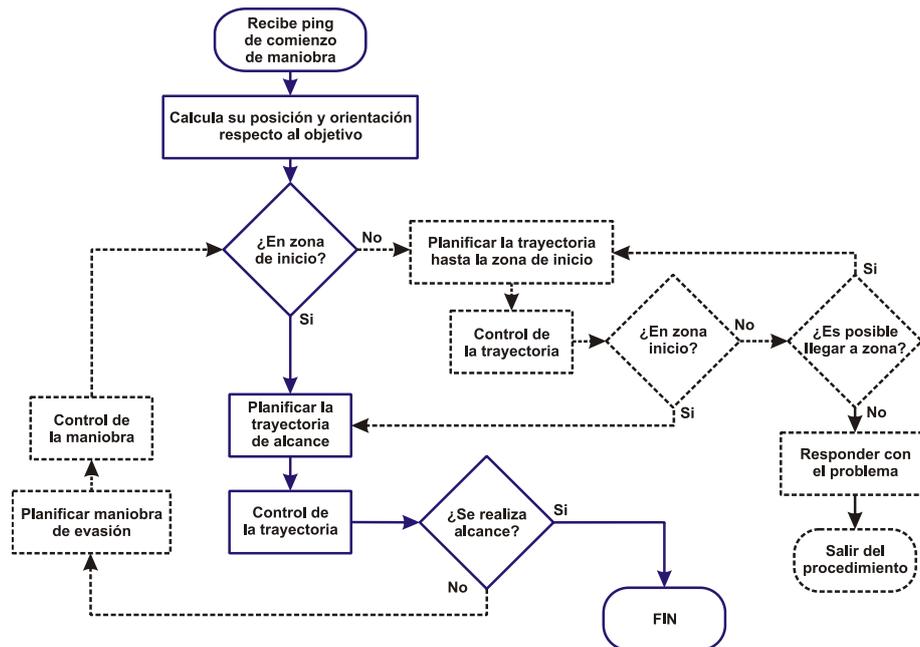


Figura 1. Diagrama del procedimiento a seguir por el UUV para alcanzar un objetivo definido. En línea continua las partes desarrolladas en este trabajo.

2. Descripción del proceso de seguimiento y alcance

El proceso de seguimiento y alcance desarrollado se divide en 3 fases básicas:

2.1. Primera fase

La primera fase del proceso comienza cuando el vehículo llega a la supuesta zona de inicio de la maniobra y queda esperando la captación de una señal que le indique el comienzo de la operación. Cuando recibe el ping para comenzar la operación, lo primero que debe realizar el UUV es calcular su posición y orientación respecto del objetivo, para ello debe utilizar instrumentos de posicionamiento subacuáticos (activos o pasivos) y/o comunicación con el objetivo. En los modelos desarrollados se ha supuesto que tanto el UUV como el objetivo disponen de un sistema de posicionamiento acústico USBL. Con este sistema es posible conocer la distancia entre objetivo y UUV con precisiones de 0,01m y resoluciones del orden de los $0,1^\circ$, [1].

Una vez determinada la posición y orientación en la que se encuentra respecto del objetivo, el algoritmo desarrollado determina si el UUV se encuentra dentro de la zona correcta para comenzar la maniobra de seguimiento y alcance. Esta zona se define respecto del sistema de referencia del objetivo y queda fijada antes de comenzar la misión. En las simulaciones realizadas con el modelo creado se ha especificado una zona prismática de $200 \times 240 \times 80$ m a popa del objetivo y alejada de él 200m. En la figura 2 se muestra dicha zona, la posición del objetivo se muestra con un punto azul y la del UUV en rojo.

En el caso de que no se encuentre dentro de esa zona se activa un proceso para llevar al vehículo a esta zona.

Cuando se confirma que el vehículo se encuentra dentro de la zona de inicio de maniobra se procede a realizar la segunda fase del proceso.

2.2. Segunda fase

Se activa un algoritmo que, a partir de la posición y orientación relativa que existe entre UUV y el objetivo, planifica una trayectoria que lleve al vehículo, con la orientación adecuada, hasta el punto de destino acordado al comienzo de la misión, evitando entrar en determinadas zonas restringidas marcadas de antemano.

En la *planificación de la trayectoria de seguimiento y alcance* se distinguen tres tramos:

- **Tramo 1.** Trayectoria curva, formada a partir de clotoides, que reorienta al UUV con el mismo rumbo del objetivo y manteniendo la cota en todo el trayecto.

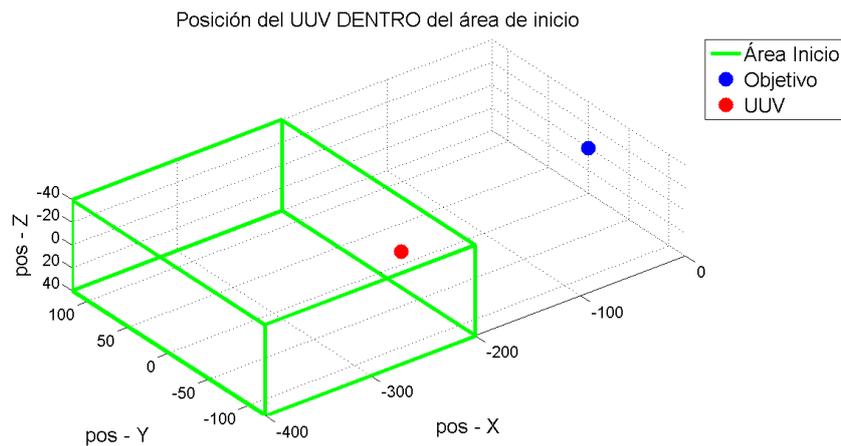


Figura 2. Zona de recogida y posiciones relativas del UUV y del submarino definidas en las simulaciones realizadas con el modelo creado.

- **Tramo 2.** Se genera una ruta mediante curvas spline que permite dirigir al UUV hasta una posición preestablecida y próxima al objetivo. Con este tramo se pretende dejar al vehículo en las mejores condiciones para afrontar la última etapa, la considerada como más crítica. En los casos simulados el punto final de este tramo se ha definido en la posición: $-48, -41, 0$ m respecto del sistema de un sistema de referencia relativo al objetivo.
- **Tramo 3.** Esta trayectoria viene predefinida dentro de la planificación. Conduce al UUV desde la posición final del tramo anterior hasta el punto objetivo final. Al ser fijada antes de comenzar la misión, ésta se podrá definir de forma que pase por las posiciones más adecuadas para evitar entrar en las zonas restringidas y llegar al objetivo en las mejores condiciones posibles.

En el algoritmo desarrollado, este tramo se ha generado a partir de curvas clotoides y rectas.

En la figura 3 se muestran los tres tramos de la trayectoria planificada junto con el recorrido seguido por el UUV NPS Aries durante la maniobra de acercamiento y entrada en una jaula. En este caso el objetivo (jaula) se movía con una velocidad lineal de 1 nudo.

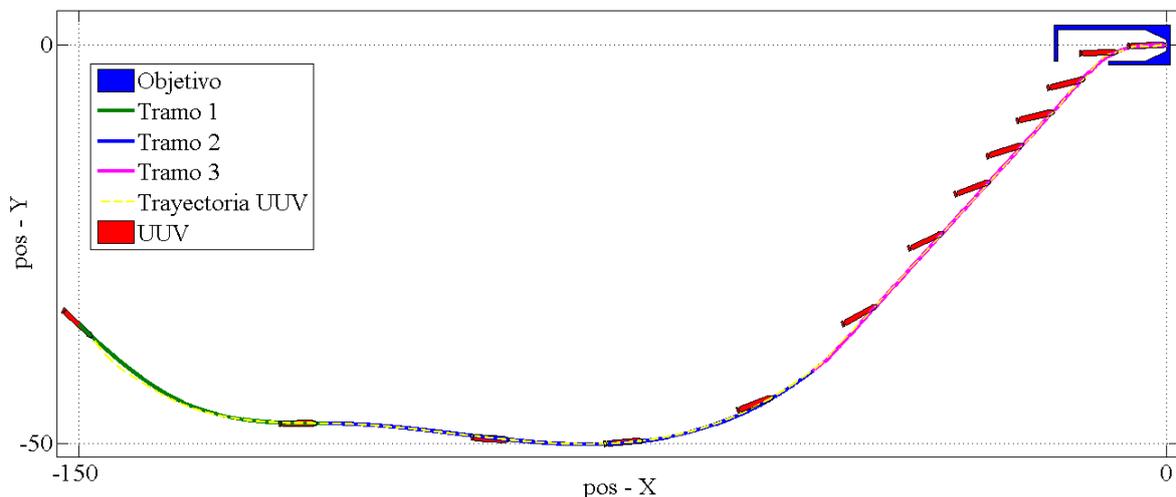


Figura 3. Vista en el plano horizontal de los diferentes tramos de la trayectoria planificada para que el UUV alcance el objetivo marcado. Trayectoria seguida por el UUV NPS Aries en una simulación en la que el objetivo se movía con velocidad de 1 nudo.

La planificación de la trayectoria se realiza considerando que la curvatura máxima de la ruta no debe exceder la que puede alcanzar el UUV. En el caso del UUV NPS Aries se ha calculado, a partir de simulaciones, que el radio mínimo de giro es de 13.5m. En el caso del UUV REMUS100 se ha obtenido un radio mínimo de 6m.

Para conseguir que estas trayectorias sean independientes del movimiento del objetivo, éstas se definen respecto de un sistema de referencia fijo a este.

Para que el movimiento del UUV en los tramos curvos de la ruta se ajuste de la forma más exacta a lo planificado, la trayectoria a seguir se detalla con un gran número de puntos de seguimiento (way-point).

Por otro lado, al definir la trayectoria, no solo se concretan las diferentes posiciones por las que debe pasar el UUV, sino que también se define la velocidad con la que el vehículo debe moverse en la dirección tangente a la trayectoria. Esto permite que el acercamiento y alcance final se realice de la forma más adecuada.

2.3. Tercera fase

Una vez planificada la ruta a seguir comienza la fase en la que se debe controlar el UUV para que siga la trayectoria. Este control permite gobernar, de forma autónoma, los timones y la propulsión del UUV a partir de las medidas tomadas por el *sistema de medida de posición, orientación y velocidad, IMU+USBL*.

En la figura 4 se muestra el esquema modular del sistema de control. Se puede observar que existen tres elementos básicos que conforman este sistema: el *Cálculo de errores*, los *Sistemas de medida de posición, orientación y velocidad IMU + USBL* y los *Controladores PD-PID*.

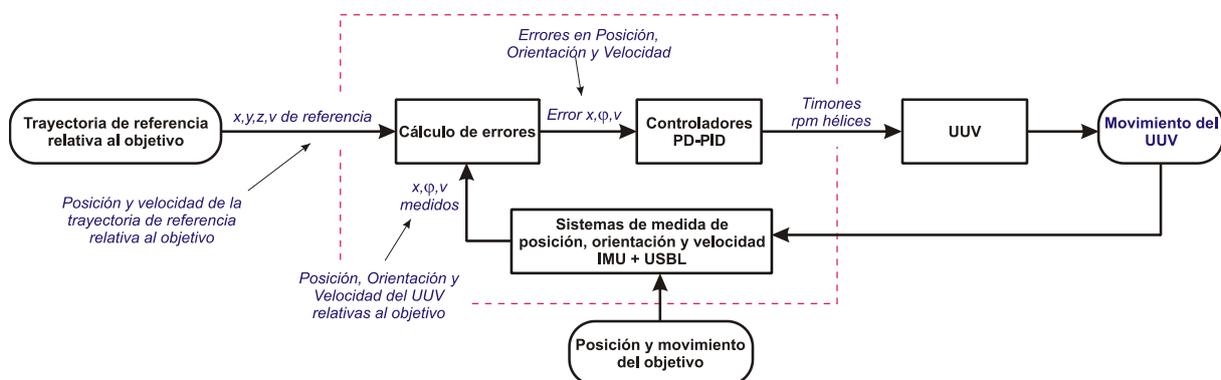


Figura 4. Esquema en el que se presentan, junto al vehículo, los diferentes elementos del sistema de control y su interrelación.

A continuación se describen brevemente cada uno de estos elementos del sistema de control de trayectoria.

3. Sistemas de medida de posición, orientación y velocidad, IMU + USBL

Este módulo se compone de diferentes sistemas de medida que permiten al vehículo conocer su posición, orientación y velocidad respecto del objetivo. Esta instrumentación consta de un sistema de posicionamiento acústico USBL y de una unidad de medición inercial o IMU.

En el sistema diseñado se han modelizado estos dos instrumentos de medida de la siguiente forma:

- Se ha simulado el comportamiento del USBL tomando los valores reales de posición y orientación absolutas del objetivo y del UUV y calculando la posición y orientación del vehículo respecto al objetivo. Una vez obtenida esta información se le añade un error aleatorio del orden de magnitud de la precisión de este dispositivo, tanto en posición, como en orientación. En las simulaciones realizadas se han utilizado valores de precisión con rangos de 0.1° y 0.01m , que como ya se ha comentado anteriormente, son los que suministran los fabricantes de este tipo de instrumentos. Por otra parte, los fabricantes de USBLs señalan que los tiempos de refresco de la información de posición son bajos, ya que la tasa de transferencia de datos es del orden de los 30kb/s , en las simulaciones realizadas se han considerado tiempos de refresco comprendidos entre 1 y 5 segundos.
- El comportamiento del IMU se ha simulado, cogiendo los valores reales de aceleración lineal y velocidad de giro del UUV, añadiendo a esos valores un error aleatorio dentro del rango de precisión de medida según fabricante, e integrando estos valores para obtener la velocidad, la posición y la orientación. En las simulaciones realizadas se han utilizado precisiones tomadas del sensor 1750-IMU del fabricante KVH INDUSTRIES, INC que produce IMUs para este tipo de aplicaciones. Concretamente se han usado errores de $\pm 2\text{mg}$ y $\pm 2^\circ/\text{hr}$.

4. Cálculo de errores

Este módulo evalúa, a partir de los datos de la trayectoria de referencia y de la información suministrada por el sistema de medida de posición, orientación y velocidad, los diferentes errores que se están cometiendo en el seguimiento de la trayectoria. Concretamente se obtienen 3 errores:

Error de posición: Se calculan dos errores: uno para el plano horizontal $|\vec{e}_h(t)|$ y otro para el vertical $|\vec{e}_z(t)|$.

El plano vertical se genera con el eje z y la recta tangente a la trayectoria en cada punto. El error sobre el plano horizontal se define como la distancia mínima que existe entre: el punto del UUV que tiene que llegar a la posición concreta del objetivo (x_{uuv}, y_{uuv}) , y la proyección horizontal de la trayectoria de referencia. Este punto de la trayectoria (x_i, y_i) , que ocupa la posición de mínima distancia respecto al punto (x_{uuv}, y_{uuv}) del UUV, es en el que debería encontrarse el vehículo. La trayectoria se encuentra definida por puntos interpolados linealmente. Los vectores de error de posición horizontal y vertical se definen para un instante como se muestra en las ecuaciones (1).

$$\vec{e}_h(t) = [x_{uuv} - x_i, y_{uuv} - y_i] \quad (1)$$

$$\vec{e}_z(t) = [0, z_{uuv} - z_i] \quad (2)$$

En la figura 5(a) se puede observar gráficamente la definición del vector de error horizontal $\vec{e}_h(t)$.

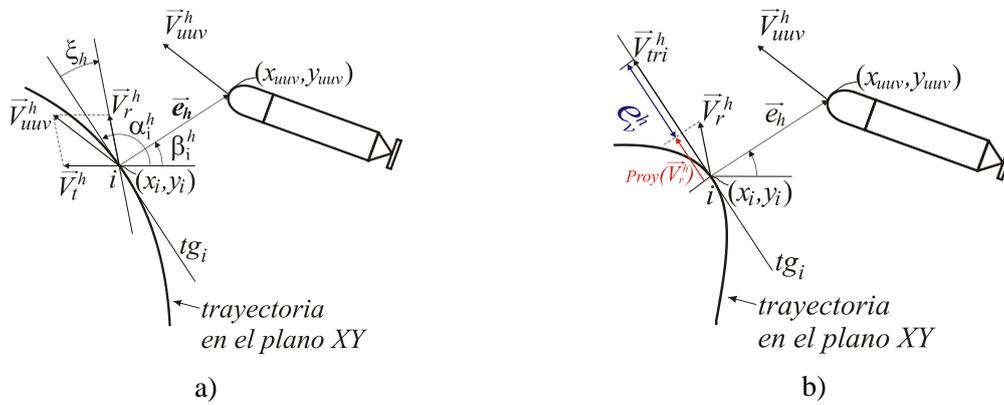


Figura 5. Esquemas en el que se muestran en el plano horizontal: (a) las variables que intervienen en el cálculo del error de trayectoria del UUV. (b) las variables que intervienen en el cálculo del error de velocidad del UUV.

El error vertical se calcula como la distancia vertical que existe entre el punto de la trayectoria en el que debería estar el UUV (x_i, y_i, z_i) y en el que realmente se encuentra $(x_{uuv}, y_{uuv}, z_{uuv})$.

Para darle robustez al sistema de control e impedir que el vehículo pueda descontrolarse como consecuencia de una perturbación, los puntos de la trayectoria de referencia que el vehículo va dejando atrás, dejan de considerarse parte de la trayectoria, de esta forma se impide que el UUV pueda retroceder sobre la trayectoria o entrar en bucles cerrados que le impidan avanzar sobre ella.

Error de orientación: El error que el vehículo comete en orientación se calcula atendiendo a la velocidad relativa que el UUV debe llevar en la dirección tangente a la trayectoria. Por ejemplo, en el caso de que el objetivo se encuentre parado, la orientación del vehículo será en cada instante la misma que la de la recta tg_i (recta tangente a la trayectoria en el punto 'i' de mínima distancia con el UUV). En la figura 5(a) se observa el error de orientación en el plano horizontal: ξ_h .

En el caso de que el objetivo se encuentre en movimiento, la trayectoria que debe seguir el UUV también se encontrará en movimiento por lo que el vehículo deberá ir persiguiendo la trayectoria al mismo tiempo que la recorre.

Para que el control se pueda realizar de la mejor forma posible, independientemente de que la trayectoria tenga o no movimiento absoluto, el error en orientación se define como la diferencia angular entre la velocidad relativa del UUV (\vec{V}_r) y la dirección de la tangente en el punto de mínima distancia.

La velocidad relativa en el plano horizontal se define según la ecuación (3). El error en orientación horizontal en un instante de tiempo, $\xi_h(t)$, se puede observar en la figura 5(a), su valor se obtiene de la ecuación (4).

$$\vec{V}_r^h = \vec{V}_{uuv}^h - \vec{V}_t^h \quad (3)$$

$$\xi_h(t) = \arg(\vec{V}_t^h) - \alpha_i^h \quad (4)$$

donde \vec{V}_{uuv}^h es la velocidad en el plano horizontal del UUV, \vec{V}_t^h es la velocidad que lleva el punto '*i-esimo*' de la trayectoria en el plano horizontal y α_i^h es la orientación horizontal de tg_i .

El error de orientación en dirección vertical, $\xi_z(t)$, se define de forma similar, solo que en este caso, se calcula la diferencia angular que existe entre la velocidad relativa del vehículo en el plano vertical tangente a la trayectoria y la recta tangente de la trayectoria en ese mismo plano. En este caso la velocidad relativa en el plano vertical se define como se muestra en la ecuación (5), y el error $\xi_z(t)$ se calcula según la ecuación (6).

$$\vec{V}_r^z = \vec{V}_{uuv}^z - \vec{V}_t^z \quad (5)$$

$$\xi_z(t) = \arg(\vec{V}_t^z) - \alpha_i^z \quad (6)$$

donde \vec{V}_{uuv}^z es la velocidad en el plano vertical del UUV, \vec{V}_t^z es la velocidad que lleva el punto '*i-esimo*' de la trayectoria en el plano vertical y α_i^z es la orientación vertical de tg_i .

Error de velocidad: Este error, e_v , se calcula como la diferencia entre la velocidad definida para el punto de la trayectoria de referencia en el que debería encontrarse el vehículo, \vec{V}_{tri} , y la proyección de la velocidad relativa del UUV sobre la recta tangente a la trayectoria en dicho punto, $Proy(\vec{V}_r)$. Su expresión se muestra en (7).

En la figura 5(b) se muestra mediante un esquema gráfico el cálculo de este error sobre el plano horizontal.

$$\vec{\Delta} = \vec{V}_{tri} - Proj(\vec{V}_r) \quad ; \quad e_v = \text{sign}(\vec{\Delta}) \cdot |\vec{\Delta}| \quad (7)$$

5. Controladores

El gobierno del UUV se realiza mediante tres controladores clásicos, dos de tipo PD (proporcional derivativo) que intervienen sobre los timones de rumbo y buceo y que gobiernan los movimientos de ceñida y de cabeceo, y un PID (proporcional integral derivativo) que interviene sobre la velocidad de giro de la hélice para controlar la velocidad del UUV. Los tres controladores diseñados son los siguientes:

- **Controlador de rumbo:** Interviene sobre el timón de rumbo en función de los errores de posición $|\vec{e}_h(t)|$ y orientación horizontal $\xi_h(t)$. El cálculo que se realiza para obtener el ángulo del timón es el que viene reflejado en la ecuación (8).

$$\lambda_{ti} = K_{pd} \left(\text{sign}(\vec{e}_h(t)) \cdot |\vec{e}_h(t)| + T_{dd} \cdot \text{sign} \left(\frac{d\vec{e}_h(t)}{dt} \right) \cdot \left| \frac{d\vec{e}_h(t)}{dt} \right| \right) + K_{pa} \left(\xi_h(t) + T_{da} \left(\frac{d\xi_h(t)}{dt} \right) \right) \quad (8)$$

donde K_{pd} y K_{pa} son los coeficientes de proporcionalidad del controlador para los errores de posición y orientación horizontal respectivamente, T_{dd} y T_{da} son las constantes de tiempo derivativo para los errores de posición y orientación horizontal respectivamente y λ_{ti} es el ángulo del timón de rumbo.

- **Controlador de buceo:** Interviene sobre el timón de buceo en función de los errores de posición $|\vec{e}_z(t)|$ y orientación vertical $\xi_z(t)$. El cálculo que se realiza para obtener el ángulo del timón es el que se muestra en la ecuación (9).

$$\lambda_{ti}^z = K_{pd}^z \left(\text{sign}(\vec{e}_z(t)) \cdot |\vec{e}_z(t)| + T_{dd}^z \cdot \text{sign} \left(\frac{d\vec{e}_z(t)}{dt} \right) \cdot \left| \frac{d\vec{e}_z(t)}{dt} \right| \right) + K_{pa}^z \left(\xi_z(t) + T_{da}^z \left(\frac{d\xi_z(t)}{dt} \right) \right) \quad (9)$$

donde K_{pd}^z y K_{pa}^z son los coeficientes de proporcionalidad del controlador para los errores de posición y orientación vertical respectivamente, T_{dd}^z y T_{da}^z son las constantes de tiempo derivativo para los errores de posición y orientación vertical respectivamente y λ_{ti}^z es el ángulo del timón de buceo.

- **Controlador de velocidad:** Este controlador actúa sobre la velocidad de giro de la hélice para controlar la velocidad de avance del UUV en función del error cometido en velocidad. En este caso el cálculo que realiza el controlador es el que aparece en la ecuación (10).

$$n_{rpm} = K_p \left(e_v(t) + T_d \cdot \frac{de_v(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \cdot \int e_v(t) \cdot dt \right) \quad (10)$$

donde K_p es el coeficiente de proporcionalidad, T_d y T_i son, respectivamente, las constantes de tiempo derivativo e integral del controlador y n_{rpm} es la velocidad de giro de la hélice.

Los coeficientes de todos los parámetros de control se han ajustado para que el control sea estable y rápido.

6. Resultados de las simulaciones

En este apartado se presentan de forma resumida algunos de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el sistema de planificación y control descrito. Los ensayos se han realizado con dos vehículos: NPS Aries y REMUS100 en diferentes situaciones.

En todos los casos presentados, la maniobra de seguimiento y alcance se configura para que el UUV entre en una jaula con forma de prima cuadrangular, a la que se accede a través de una apertura lateral. La forma y dimensiones de este cajón se muestran en la figura 6.

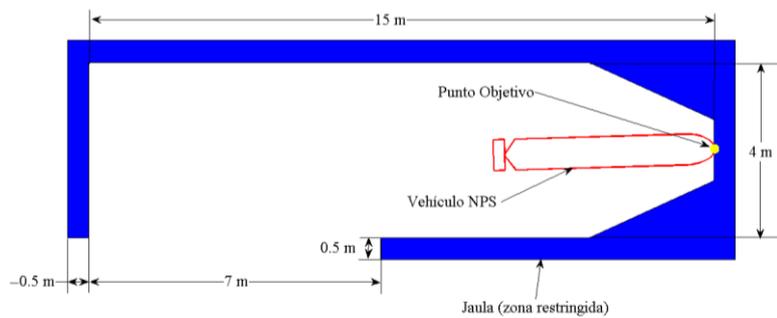


Figura 6. Esquema de la proyección en el plano horizontal de la jaula considerada como objetivo a alcanzar por el UUV en los ensayos realizados. Localización del Punto Objetivo final y de la zona restringida.

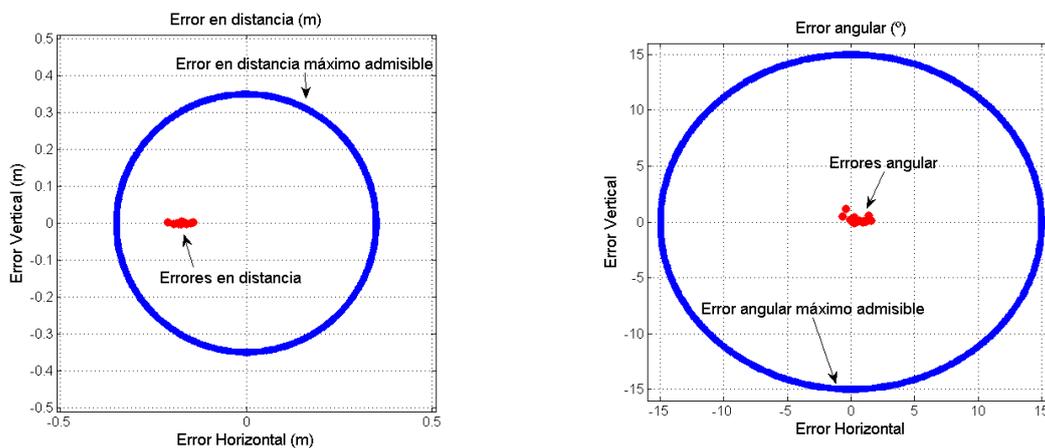


Figura 7. Errores finales en posición y orientación cometidos por el NPS Aries, para 20 pruebas.

En la figura 7 se presentan los errores en posición y orientación cometidos por el UUV NPS Aries cuando llega al Punto Objetivo final para 20 ensayos en las siguientes condiciones:

- Los errores supuestos en los sistemas de medida son los expuestos anteriormente, es decir, USBL = 0.1° ; 0.01m. IMU = $\pm 2\text{mg}$; $\pm 2^\circ/\text{hr}$. El tiempo de refresco del USBL es de 1 segundo.
- El área objetivo admisible se ha marcado como una circunferencia de 1 m de diámetro. El error admisible de orientación en la llegada de 15° .

- La posición y orientación inicial del UUV, respecto del sistema de referencia fijo al objetivo, es respectivamente $(-210,-80,-40\text{ m})$ y $(-45^\circ,0^\circ)$.
- El objetivo se encuentra a una velocidad de 1 nudo y la velocidad relativa de llegada del vehículo al punto final se ha configurado a 0.3 m/s.

En la figura 8 se presentan algunos de los resultados obtenidos para otros 5 ensayos cuyas condiciones son las mismas que las del ensayo anterior, pero, simulando con el UUV REMUS100 y con el objetivo parado. En la figura se muestran los errores, tanto en distancia como en orientación, que comete el UUV durante todo el tiempo que dura la maniobra.

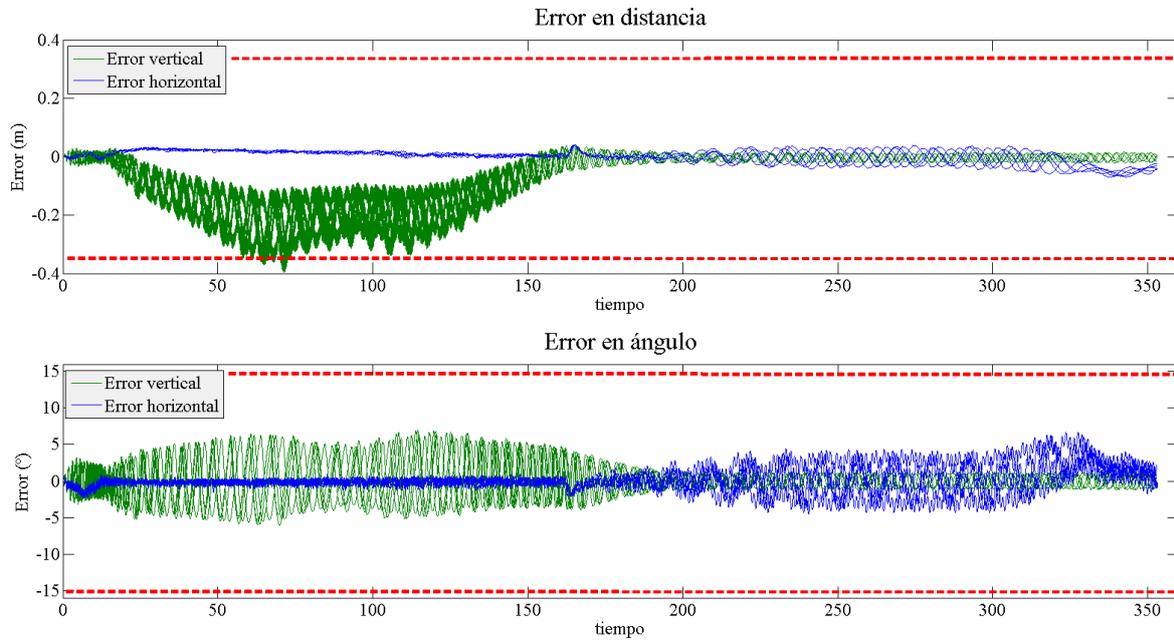


Figura 8. Errores en distancia y orientación cometidos por el REMUS100 hasta alcanzar el objetivo marcado.

7. Conclusiones

Se han desarrollado unos algoritmos para que un UUV pueda realizar el seguimiento o alcance de un objetivo submarino en movimiento. De los resultados obtenidos se puede deducir que los sistemas de planificación y de control de la trayectoria diseñados son capaces de gobernar el UUV para guiarlo desde la zona de inicio de la operación hasta el punto objetivo con un errores en distancia menor de 0.5m y menor de 10° en orientación. El error cometido al final del recorrido no supera en ninguno de los casos los 0.2m en distancia, ni los 5° en orientación. Se comprueba que el vehículo, durante su acercamiento al objetivo no invade en ninguno de los casos simulados las zonas restringidas marcadas en los ensayos.

8. Referencias

- [1] EvoLogics. USBL positioning and communication systems. Product information guide, 2013.
- [2] T. Prestero. Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle. Master's Thesis, MIT/ WHOI, 2001.
- [3] Fossen Thor I. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons, New York, second ed, 1994.
- [4] M. Barisic, Z. Vukic and N. Miskovic. Formation Guidance of AUVs Using Decentralized Control Functions. Autonomous Underwater Vehicles, Ed. InTech. 2011, pp 97-105.
- [5] Morten Breivik and Thor I. Fossen. Guidance Laws for Autonomous Underwater. Vehicles Underwater Vehicles, pp. 582, December 2008, I-Tech, Vienna, Austria
- [6] M Barisic, Z. Vukic and N. Miskovic. Kinematic Simulative Analysis of Virtual Potential Field Method for AUV Trajectory Planning. Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Automation,2007,Athens.