

ESTUDIO INICIAL DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO MARINO DE SUPERFICIE

Puente, S.T.

Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, santiago.puente@ua.es

Torres, F.

Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, fernando.torres@ua.es

Candelas, F.

Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, francisco.candelas@ua.es

Cano, C.

Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, ccel@alu.ua.es

Resumen

Este artículo presenta un prototipo inicial de vehículo marino de superficie multicasco. El trabajo se centra en la descripción de los elementos que componen el vehículo, especialmente en los actuadores. Además, se describe el modelo cinemático del vehículo basado en n cascos con un cuerpo central. El diseño presentado utiliza una hélice independiente en cada uno de los cascos, lo que añade redundancia al diseño y permite una mayor maniobrabilidad y tolerancia ante fallos. Además, este trabajo se centra en el diseño de cada uno de los cascos, proporcionándole a cada uno un grado extra de libertad. Finalmente se presenta la construcción de los elementos del prototipo utilizando una impresora 3D así como los resultados de la simulación de trayectorias sencillas.

Palabras Clave: robótica marina, multicasco, vehículo autónomo de superficie, ASV.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la robótica marina es un campo de investigación en auge. Existen investigaciones tanto en robots autónomos submarinos (AUV) [4, 7, 8], como en sistemas autónomos de superficie (ASV) [3, 9]. Coordinar ambas aproximaciones permite un mejor entendimiento de los entornos marinos [5].

El trabajo actual se centra en el campo de la robótica móvil, especialmente en robots ASV. La mayoría de diseños existentes se centran en resolver el problema de control que supone un sistema dinámico como es el entorno marino. Dentro del estado del arte existen diversas aproximaciones par el control y seguimiento de trayectorias [1, 2, 6].

En el presente estudio, se presenta una solución que consigue aportar flexibilidad, maniobrabilidad, así como un control redundante. Este trabajo se centra en el diseño de un prototipo inicial, usando un control simplificado del sistema.

El mayor problema encontrado en el entorno marino es la dinámica del entorno. La dinámica tiene un alto grado de imprevisibilidad comparado con entornos terrestres. Por lo tanto se pueden plantear dos soluciones, modelar el sistema de una manera detallada para realizar un control complejo del mismo u otra por una modelización aproximada que permita un control más sencillo y por tanto buscar una adaptabilidad al entorno más rápida y eficaz.

El artículo se ha organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se presenta el análisis cinemático de la solución propuesta. En la sección 3 se describe el diseño del sistema con sus características mecánicas y electrónicas. Finalmente en la sección 4 se muestran los resultados de la simulación, para terminar en la sección 5 con las conclusiones.

2 ANÁLISIS CINEMÁTICO

El modelo cinemático es una parte crucial del proceso de diseño, ya que se utiliza para el controlador y la simulación del sistema. Para definir el modelo cinemático se utilizan las siguientes restricciones:

- El barco es un sistema rígido: Tener en cuenta las partes flexibles genera componentes dinámicas que aumentan la complejidad del controlador.

- El movimiento se realiza en 2 dimensiones: En este primer prototipo no se tiene en cuenta el efecto de las olas, por lo que se puede reducir la dimensión del espacio de trabajo a 2.
- Sin fricción: El análisis cinemático se realiza suponiendo condiciones ideales; no se consideran la fricción del agua y del viento.

El modelo cinemático genérico se muestra en la Figura 1.

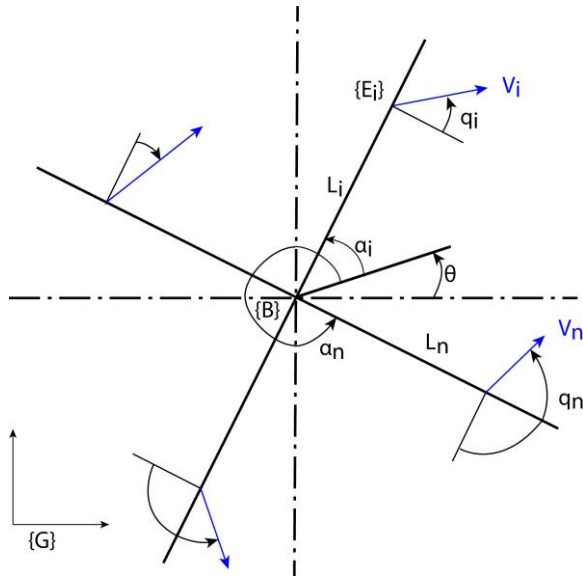


Figura 1: Esquema básico del robot

Este modelo soporta hasta n articulaciones, correspondiente cada una de ellas a un casco. Cada una de ellas puede tener diferente longitud y posición, lo que plantea una gran flexibilidad al sistema, permitiendo que se ajuste según las condiciones a la mejor configuración. Un ASV consiste en una tupla de n grupos de parámetros, uno por cada brazo. La tupla para el brazo Arm_i se muestra en la ecuación 1.

$$Arm_i = \{\alpha_i, L_i, q_i, V_i\} \quad (1)$$

Donde α_i representa el ángulo entre el brazo y el eje horizontal, L_i representa la longitud del brazo, la separación desde el centro del cuerpo principal hasta el eje del casco; q_i representa el ángulo de empuje de la hélice existente en dicho casco; y V_i representa la velocidad generada por el empuje del brazo Arm_i .

Para calcular el desplazamiento del barco (x,y) , en relación a las coordenadas globales $\{G\}$, se utilizan las ecuaciones 2, 3 y 4.

$$\dot{x} = \sum_{i=0}^{n-1} \cos(q_i + \alpha_i + \theta) \cdot V_i \quad (2)$$

$$\dot{y} = \sum_{i=0}^{n-1} \sin(q_i + \alpha_i + \theta) \cdot V_i \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\cos(q_i)}{2L_i} \cdot V_i \quad (4)$$

Donde θ es la orientación del barco, el rumbo. El valor de V_i se utiliza para calcular dicha orientación. La relación entre cada uno de los brazos y la localización del barco viene determinada por la matriz jacobiana de la ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} V_{xv} \\ V_{yv} \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & \dots & C_i & \dots & C_n \\ S_0 & \dots & S_i & \dots & S_n \\ \frac{\cos(q_0)}{2L_0} & \dots & \frac{\cos(q_i)}{2L_i} & \dots & \frac{\cos(q_n)}{2L_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde C_i y S_i se corresponden con el coseno y seno de $(q_i + \alpha_i + \theta)$ respectivamente. Hay que tener en cuenta que se trata de una matriz no cuadrada, y por lo tanto no invertible, por lo que para obtener la inversa se busca la pseudoinversa, teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio de la ecuación 6.

$$\tau = J^T(q)F \quad (6)$$

Dónde F representa las fuerzas aplicadas en la base del barco, y τ representa las fuerzas aplicadas en cada uno de los cascos. De esta manera, se establece la relación de fuerzas entre las aplicadas a cada una de las articulaciones y el cuerpo central del barco. Ambas fuerzas se encuentran interrelacionadas mediante la Jacobiana transpuesta de acuerdo a la ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} \tau_0 \\ \vdots \\ \tau_i \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & S_0 & \frac{\cos(q_0)}{2L_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_i & S_i & \frac{\cos(q_i)}{2L_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & S_n & \frac{\cos(q_n)}{2L_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

De esta manera, se tiene definida la cinemática inversa del barco. Un aspecto importante, de estas ecuaciones es que representan el sistema utilizando fuerzas, y en consecuencia hay que realizar una

transformación entre la velocidad deseada y la fuerza requerida para llegar a ella. Para conseguir esta transformación aspectos dinámicos son considerados. Por lo tanto, el valor de V_i se resuelve para un valor particular de V_{xv} , V_{yv} o θ_v . Los ángulos q_i se consideran como variables fijas del sistema, de esta manera se reduce la complejidad del sistema a calcular V_i y los valores angulares pueden utilizarse para optimización a la hora de generar trayectorias para la optimización del gasto de energía y reducir el desgaste mecánico. Además, V_i se corresponde con la velocidad teórica generada por el giro de las hélices correspondientes al Arm_i . Para optimizar el cálculo de este parámetro, se deben tener en cuenta los parámetros de la hélice, de tal manera que la velocidad en el casco i viene definida por la ecuación 8.

$$V_i = step \cdot \frac{RPM_i}{60} \quad (8)$$

Donde *step* corresponde con el avance de la hélice en una revolución, considerando un entorno no deformable y en el que toda la energía del motor se utiliza en generar el movimiento de la hélice.

3 DISEÑO DEL SISTEMA

El barco diseñado presenta características de flexibilidad, modularidad y estabilidad, que son opciones deseables para sistemas ASV. Todas estas características son básicas para tener una plataforma de experimentación e investigación del entorno marino. Además, al ser un sistema redundante, permite una mayor adaptabilidad a la tarea a realizar en cada momento, así como a cambios en el entorno. Esto es muy útil debido a que el entorno marino es un entorno altamente dinámico.

3.1 DISEÑO MECÁNICO

Para el diseño de este primer prototipo, se han elegido materiales de ligeros, de bajo coste, y se ha utilizado una electrónica embebida en el sistema. Todas las partes se han imprimido mediante una impresora 3D, lo que permite un método rápido de prototipado. El material utilizado es ABS, cuyas propiedades físicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características del material ABS

Parámetro	Valor
Elongación hasta ruptura	45%
Coefficiente de fricción	0,5
Módulo tractor (GPa)	2,1-2,4
Resistencia al impacto ($J \cdot m^{-1}$)	299-400
Absorción de agua (en 24h)	0,3%-0,7%
Densidad ($g \cdot cm^3$)	1,05

El diseño se divide en varias partes, primero el cuerpo central, donde se encuentra ubicada la inteligencia del ASV para controlar al resto de elementos. En esta parte, se ubican las baterías, la electrónica y los sensores principales. Otra parte son los brazos, que unen el cuerpo central con cada uno de los cascos, permitiendo su rotación independiente. Finalmente están los cascos, donde el motor independiente de la hélice se ubica con su controlador, además, para la comunicación entre el casco y los brazos e utiliza un sistema de comunicación infrarroja para evitar problemas cuando la base del casco gire.

Cada uno de los cascos representa los elementos más complejos mecánicamente del barco. Se han diseñado para permitir una rotación de 360° , debido a ello se ha añadido un sistema de comunicación infrarroja para evitar los problemas con los cables al rotar cada casco. Para conseguirlo, en los engranajes se sitúan las parejas de emisor/receptor, una en cada lado del caso, en la parte fija y en la móvil. El diseño realizado se muestra en la Figura 2.

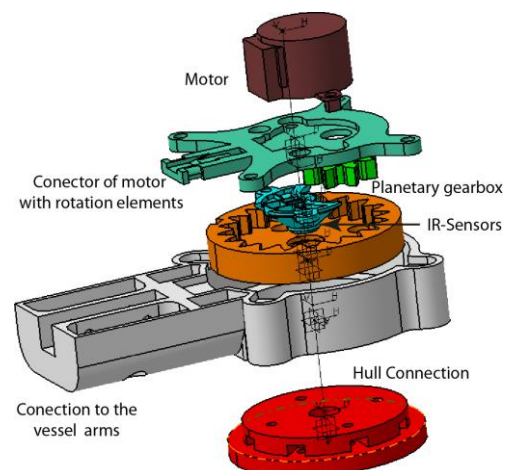


Figura 2: Diseño de la conexión del casco con los brazos.

En la Figura 3 se muestran los cascos del barco una vez impresos y montados, a falta de la tapa inferior con la hélice para generar la propulsión.



Figura 3: Piezas impresas y montaje del brazo con el casco.

Para obtener el par requerido por la hélice de cada casco, se han realizado una serie de simulaciones utilizando los parámetros de las Tablas 2, 3 y 4, que representan el peso de cada uno de los componentes para cada una de las partes del barco respectivamente.

Tabla 2: Brazo del barco

Pieza	Peso (g)
Base	56
Conector inferior	25
Conector superior	18
Motor	35
Fijación del motor	9
Fijación de los sensores	2
Brazo	30
Driver del motor	7,5
Cubierta	75
Total	258,5

Tabla 3: Cuerpo principal del barco

Pieza	Peso (g)
Base	250
Raspberry	26
Arduino	36
Batería	150
Adaptador WiFi	60
GPS+IMU	12
Cubierta	190
Total	724

Tabla 4: Casco del barco

Pieza	Peso (g)
Batería	64
Arduino Pro-mini	6
Motor DC	120
Varios	60
Cubierta	164
Total	414

En base a los datos de las Tablas 2, 3 y 4, se calcula el peso que soporta cada casco W_h según la ecuación 9.

$$W_h = \frac{\text{Total weight}}{4} = 689,5g \quad (9)$$

Una vez se tiene el valor de W_h y utilizando el volumen de cada casco, $V_h=9,518cm^3$, se calcula el desplazamiento del agua, V_w , según la ecuación 10.

$$W_w = \frac{\text{Densidad agua}}{W_h} = \frac{1g/m^3}{9,518cm^3} = 951,8g \quad (10)$$

Seguidamente, se requiere utilizar el peso del casco, H_w , con un valor de 164g para calcular el parámetro W_r del barco según la ecuación 11.

$$W_r = W_w - W_h - H_w = 98,3g \quad (11)$$

Seguidamente, hay que calcular el coeficiente de flotabilidad F_c que se calcula según la ecuación 12

$$F_c = \frac{W_r}{W_w} = 10,3\% \quad (12)$$

Finalmente, según la ecuación 13, se calcula la línea de flotación real del barco, C_r , utilizando el valor de la línea ideal de flotación C_i que tiene un valor de 55mm.

$$C_r = \frac{\text{Ideal waterline}}{F_c} = 49,3mm \quad (13)$$

Como resultado de la simulación, se ha obtenido que se requiere un par de 69mNm. En base a este valor se ha seleccionado el motor para la hélice de cada casco. Además, para llevar a cabo la rotación de cada uno de los cascos de manera independiente, se ha utilizado un motor paso a paso, el motor elegido es el 28BYJ-48 de 12V DC que proporciona un par de 44,1mNm, para ajustar al par requerido para la rotación del casco se ha incluido un reductor planetario con una reducción de 2,71, lo que proporciona un par final de 120,05mNm.

En cada casco, el movimiento de la hélice será controlado de manera independiente, es decir, dispone de un controlador y una batería en cada uno de ellos (Tabla 4). Con ello se aumenta la tolerancia a fallos y evita la necesidad de pasar cables entre la parte fija del casco y la móvil.

Los brazos de del barco se componen de una guía de aluminio situada 10mm sobre la línea de flotación. Dentro de esta guía se sitúan los cables de control que los cascos requieren desde el cuerpo central. El diseño de esta pieza, así como, su acoplamiento al cuerpo central y a los cascos se muestra en la Figura 4.

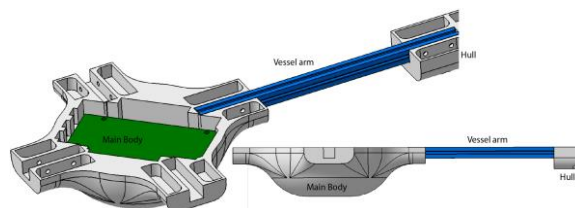


Figura 4: Brazo del barco.

3.2 ESQUEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico y de control diseñado está pensado en que sea modular y escalable, por eso cada articulación tiene su electrónica propia, que se comunican directamente con el controlador principal. Además, cada articulación está aislada del resto del barco, lo que protege al conjunto de filtraciones que produzcan errores en alguno de los cascos. En la Figura 5 se muestra una representación general del esquema electrónico del barco.

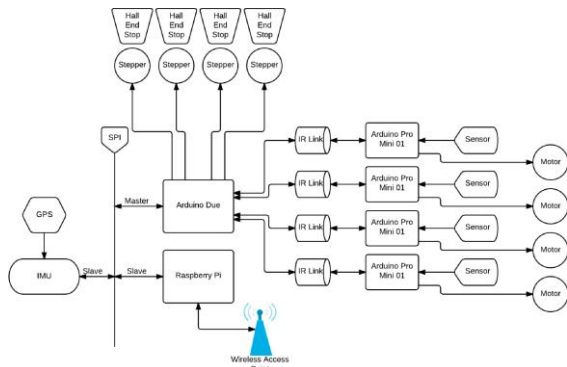


Figura 5: Esquema de control del barco.

El cerebro principal del sistema está formado por un microcontrolador Raspberry Pi, que se conecta con la estación base mediante WiFi, y está conectado a los sensores (IMU & GPS), además de al Arduino mediante el bus SPI. La placa Arduino está conectada a cada uno de los motores paso a paso para llevar a cabo el control de la rotación de cada uno de los cascos. Además, está conectado, mediante el sistema de transmisión infrarrojo a cada uno de los cascos, que disponen de un microcontrolador Arduino-mini para controlar el empuje generado por la hélice de cada casco.

La conexión infrarroja se necesita para reducir la complejidad del cableado al permitir la rotación completa de los cascos. El esquema de este enlace se muestra en la Figura 6. Este canal consigue una velocidad de transmisión de 4800bps, debido a los componentes utilizados.

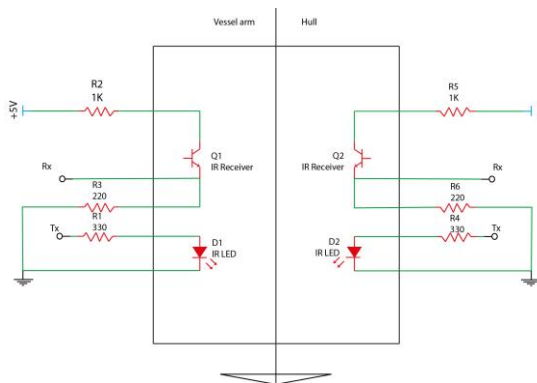


Figura 6: IR-Link entre el caso y el brazo del barco.

Par conseguir una correcta comunicación, el enlace infrarrojo se realiza de manera síncrona, controlada por el procesador central. El procesador central envía un paquete al caso, si lo recibe contesta con un reconocimiento si el comando se ha ejecutado correctamente, o con un reconocimiento más datos si el comando requería la devolución de información al controlador principal. Por lo tanto, en el caso de que el controlador principal no reciba señal de respuesta del caso entiende que se ha perdido el paquete por lo que realizará un reenvío del mismo, y en caso de no poder comunicarse decidirá que tiene que operar con un casco menos.

4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El barco que se ha construido para las pruebas consta de cuatro brazos de igual longitud y equidistantes entre sí. En la Tabla 5 se muestran los parámetros del barco. Donde el grado de libertad q_i corresponde con la rotación que se aplica a cada uno de los cascos.

Tabla 5: Parámetros del barco

Articulación/parámetro	Valor
join ₀ q_0	q_0
α_0	-45°
L_0	295mm
join ₁ q_1	q_1
α_1	$+45^\circ$
L_1	295mm
join ₂ q_2	q_2
α_2	-135°
L_2	295mm
join ₃ q_3	q_3
α_3	$+135^\circ$
L_3	295mm

De cara a realizar la simulación se han probado tres escenarios que se van a mostrar a continuación. Los parámetros utilizados en las simulaciones son θ que representa la orientación del barco, los valores x e y que representa la posición del barco en el espacio. Los experimentos se han realizado suponiendo unas condiciones ideales del sistema.

En la Figura 7, se muestra el ejemplo de una trayectoria circular, donde cada una de las articulaciones se encuentran fijas en una posición que viene definida para cada uno de los valores articulares con el siguiente valor (45° , -45° , -135° , 135°).

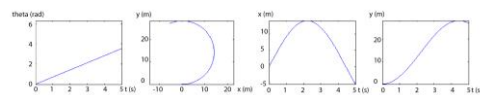


Figura 7: Simulación de movimiento circular.

En el caso del segundo experimento, se ha planificado un movimiento lineal a lo largo del eje x , tal y como se muestra en la Figura 8. En este caso los parámetros iniciales se han dejado igual que para el caso anterior.

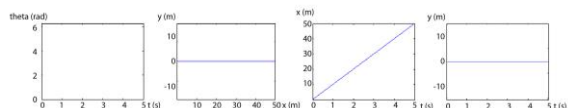


Figura 8: Simulación de movimiento lineal en x .

Como tercer ejemplo de simulación, se ha realizado un movimiento lineal a lo largo del eje x e y . El resultado se muestra en la Figura 9, en el que como orientaciones fijas de los cascos se han utilizado los valores definidos por $(90^\circ, 0^\circ, -90^\circ, -180^\circ)$.

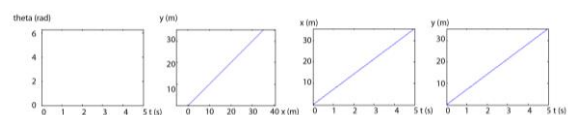


Figura 9: Simulación de movimiento lineal en x e y .

5 CONCLUSIONES

Se ha realizado el diseño de un barco redundante, que permite una gran flexibilidad a la hora de realizar tareas. Se ha especificado el modelo cinemático, y se ha realizado el diseño mecánico y eléctrico. Parte del prototipo de la plataforma robotizada se ha construido.

El control independiente en cada uno de los cascos permite un sistema de control distribuido y una mayor tolerancia a fallos.

En el futuro se va a trabajar en perfeccionar el control implementado, así como, en la terminación del prototipo y su prueba en un entorno real.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado gracias a los fondos del Gobierno de España (DPI2015-68087-R) y de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2013/085).

Referencias

- [1] Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Lapierre, L., (2009). "Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle". *Journal of Field Robotics* 26(8), pp. 669-688.
- [2] Elmokadem, T., Zribi, M., Youcef-Toumi, K., (2015). "Trajectory tracking sliding mode

control of underactuated AUVs". *Nonlinear Dynamics* 84(2), pp. 1079-1091.

- [3] Hitz, G., Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., (2015). "Relaxing the planar assumption: 3d state estimation for an autonomous surface vessel". *The International Journal of Robotics Research* 34(13), pp. 1604-1621.
- [4] Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Sanz, P. J., and Oliver, G., (2015). "Intervention AUVs: The Next Challenge", *Annual Reviews in Control*, 40, pp. 227-241.
- [5] Roberts, G., (2008). "Trends in marine control systems". *Annual reviews in control* 32(2), pp. 263-269.
- [6] Russell B. Wynna Veerle A.I. Huvennea, et al., (2014). "Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience", *Marine Geology* 352, pp. 451-468.
- [7] Salimzhan A. Gafurov, E.V.K., (2015). "Autonomous unmanned underwater vehicles development tendencies", *Procedia Engineering* 106, pp. 141-148.
- [8] Shojaei, K., (2016). "Observer-based neural adaptive formation control of autonomous surface vessels with limited torque". *Robotics and Autonomous Systems* 78, pp. 83-96..
- [9] Zheng, Z., Sun, L. (2016). "Path following control for marine surface vessel with uncertainties and input saturation". *Neurocomputing* 177, pp. 158-167.