

Concepción, Desarrollo y Avances en el Control de Navegación de Robots Submarinos Paralelos: El Robot Remo-I

César Álvarez*, Roque Saltaren**, Rafael Aracil**, Cecilia García***

**Departamento de Electrónica y Control, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela.
(e-mail: cesaralvarez.a@gmail.com)*

***Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática, Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006, Madrid, España. (e-mails: rafael.aracil@upm.es / manuel.ferre@upm.es)*

****Departamento de Electrónica, Automática e Informática, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Ronda de Valencia, Nº 3, 28012, Madrid, España. (e-mails: cecilia.garciac@upm.es)*

Resumen: El robot REMO I es un vehículo submarino operado remotamente (ROV), que tiene como cuerpo principal, una estructura paralela de Stewart – Gough, que le permite variar su geometría para realizar maniobras de navegación con gran flexibilidad con solo modificar la orientación y el desplazamiento de un único impulsor situado en la parte trasera. Como consecuencia, el robot puede describir trayectorias complejas para llegar a lugares de difícil acceso dentro del agua. En este trabajo se presenta una breve descripción mecánica del REMO I, su sistema de instrumentación y control, y las estrategias a utilizar para la arquitectura de control que se emplea en el control de lastrado y la navegación. Copyright © 2009 CEA-IFAC.

Palabras Clave: Vehículos submarinos, robots submarinos, estructura paralela, plataformas Stewart – Gough, ROV, AUV.

1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos submarinos no tripulados han sido un campo activo de investigación durante más de cinco décadas (Bohm 2001). Desde hace mucho tiempo ha existido el interés por conocer lo que hay en las profundidades de los lagos, ríos, mares y océanos del mundo. En tiempos más recientes este interés ha aumentado, debido al gran potencial económico, social y la importancia política que representa la preservación de las profundidades marítimas. A esto se le suma la posibilidad de realizar la explotación controlada de recursos en el fondo marino, con miras a no dañar el ambiente, o la búsqueda y rescate de naufragios, y particularmente, aquellos que presentan alguna fuga de material contaminante. Para lograr esto se hace necesaria la investigación en el desarrollo de equipos, que permitan dar a conocer lo que hay en estas profundidades marinas y realizar tareas que serían muy arriesgadas y costosas si las hicieran directamente los seres humanos.

El desarrollo de vehículos submarinos remotamente operados (ROV Remotely Opered Vehicles), o robots submarinos que realicen tareas preprogramadas o autónomas (AUV Autonomous Underwater Vehicles) han surgido como respuesta para realizar actividades dentro del agua (Valvanis, et al., 1997) sin necesidad de exponer a los seres humanos a un mayor riesgo.

Haciendo un poco de historia, según Dario, et al. (2004), puede decirse que el primer vehículo submarino programado fue un torpedo desarrollado por Luppis–Whitehead Automobile en Austria en 1864; pero al hablar de robótica, el primer ROV, llamado POODLE fue desarrollado por Dimitri Rebikoff (Francia) en 1953. Después le sucedieron otros vehículos del tipo AUV tales como el SEA SPOOK de Rebikoff y el SPURV

construido por la Universidad de Washington. A éstos le siguieron otros como el SKAT del Shirshov Institute of Oceanology (Rusia), el OSR-V (Japón), los EAVE's, RUMIC y UFSS (U.S.A.), y el EPAULARD (Francia). Desafortunadamente, la mayoría de estos AUV eran muy grandes, ineficientes y demasiado costosos. Esto hizo que en la década de 1980 los ROV fueran ganando espacio frente a los AUV. Sin embargo, a partir de la década de 1990, se ha recuperado el interés por el desarrollo de los AUV, debido al surgimiento de nuevas tecnologías electrónicas compactas, el desarrollo de motores pequeños de alta eficiencia y la aparición de baterías recargables de mayor duración. Actualmente, hay muchos temas que necesitan solución para la efectiva aplicación de los AUV, uno de ellos es el diseño de tecnologías robustas de comunicación y autonomía (Valvanis, et. al. 1997), otro de los problemas de los vehículos submarinos es determinar la posición exacta a muy altas profundidades (Wernli, 1999).

Las principales ventajas y desventajas del empleo de la tecnología ROV (vehículos operados remotamente) con respecto a los AUV (vehículos submarinos autónomos) en el ambiente marino se basan en el empleo del cordón umbilical. A través de él los ROV tienen la posibilidad de transmitir la energía eléctrica a los dispositivos eléctricos y electrónicos del equipo bajo el agua, y la comunicación en tiempo real entre los equipos de superficie y el robot submarino. Al contar con la energía eléctrica desde la superficie, prácticamente no existe restricción en el tiempo que puede estar un ROV dentro del agua. Por otro lado, al mantener una comunicación vía cable o fibra óptica, los datos se transmiten a muy alta velocidad, por lo cual permitirá observar imágenes submarinas en la superficie, hacer tareas de control en tiempo real y realizar actividades de telemanipulación. En el caso de los AUV la transmisión

inalámbrica sólo se puede efectuar a pocos metros de distancia, debido a que las ondas electromagnéticas se atenúan fuertemente dentro del agua (Chantler, et al. 1994). Otra posible forma de transmitir datos, es por ondas sonoras; sin embargo, éstas tienen una velocidad de unos 1500 m/S, lo cual limita la posibilidad de transmitir datos en tiempo real.

Hoy en día existe una gran diversidad de robots submarinos. De ellos, hay pocos que tienen la capacidad de mover el impulsor para el guiado y la navegación simultáneamente. Fossen y Berge (1997), desarrollaron un modelo para ser aplicado a vehículos marinos que utilizan impulsores vectorizados. Le Page y Holappa (2000a), (2000b), analizaron la dinámica de fluido de un vehículo submarino autónomo equipado con un impulsor vectorizado. Ellos introducen una solución para el flujo que circula alrededor del AUV, además que mencionan las ventajas de utilizar un impulsor vectorizado para la navegación de vehículos submarinos, ya que ofrecen una mayor maniobrabilidad a bajas velocidades. Para el control del AUV, comparan los algoritmos PID con la lógica borrosa (fuzzy) y control deslizante comprobando que este último tiene un mejor desempeño. Morel y Leonessa (2003), muestran la versatilidad en el uso de impulsores vectorizados, los cuales permiten un control más preciso en la trayectoria de un vehículo submarino. Cavallo y Michelini (2004), utilizan un impulsor vectorizado, el cual produce sus movimientos mediante una plataforma paralela de 3 grados de libertad, lo cual es un primer inicio a la utilización de este tipo de plataforma para la navegación de un robot submarino.

En robot REMO I, presenta importantes diferencias en relación a los vehículos submarinos mencionados anteriormente, y es que está diseñado para cambiar su geometría, mediante esta deformación, podrá navegar en cualquier dirección (Saltaren, et al., 2004) con una mayor flexibilidad que los vehículos con impulsores vectorizados, ya que la parte central del REMO I consta de una plataforma paralela de Stewart – Gough (S-G), la cual permite que los movimientos del timón del robot (anillo posterior impulsor) se efectúen con 6 grados de libertad. Debido a la complejidad que puede ofrecer el manejo de un robot de estas características, en este trabajo se explicarán algunas estrategias iniciales para controlar el manejo de este robot mediante un joystick comercial.

2. DESCRIPCIÓN DEL REMO I

Las siglas REMO significan “Robot de Estructura -paralela para la Medición y Observación oceanográfica”. Este proyecto fue financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, para el soporte de acciones para la prevención de desastres VM2003-20017 y por el proyecto ROBOCITY-2030 de la comunidad de Madrid. En la figura 1 se puede observar las partes principales del REMO I, en la que se destaca la plataforma Stewart – Gough en la parte central, que, junto al impulsor, son la base del funcionamiento para la navegación de este robot submarino.

En la Figura 1 se puede observar una imagen del robot REMO I. La base del robot constituye la parte delantera y aquí se sitúan los circuitos electrónicos de medición, control, fuentes de alimentación y amplificadores. El impulsor y el efector se sitúan en la parte trasera o timón. A través de juntas universales y esféricas la base y el timón quedan unidos a los seis actuadores lineales con los que cuenta el robot.

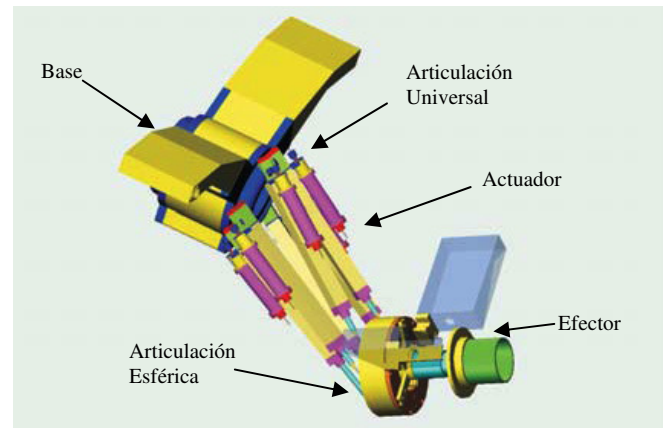


Figura 1. Partes del robot paralelo REMO I.

La navegación de este vehículo se realiza por medio del impulsor trasero, que proporciona la fuerza de empuje del robot, y de los actuadores lineales de la plataforma de S-G, que permiten orientar y desplazar la estructura; de esta manera es posible realizar giros, ascender o descender. Para neutralizar automáticamente la flotabilidad en el agua se disponen de dos tanques de lastre situados uno en cada aleta. Los actuadores se actúan de manera coordinada, para obtener la orientación y desplazamiento requeridos entre la base y el efector final, y con ello lograr el movimiento deseado para la navegación. En la Figura 2, se muestra una foto del REMO I durante una de las pruebas realizadas.

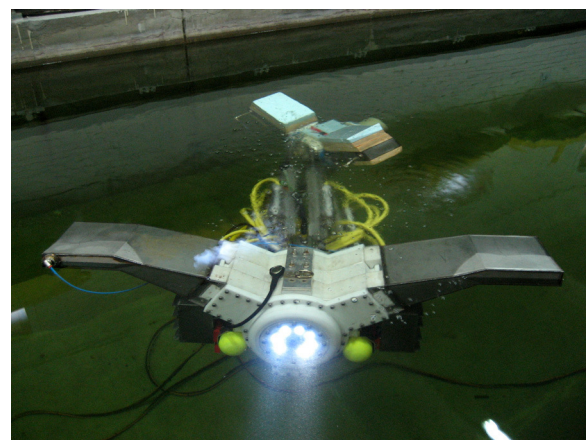


Figura 2. Vista del REMO I

El primer prototipo del proyecto REMO, el REMO I, consiste en un vehículo remotamente operado que tiene 170 mm de ancho y su largo puede variar entre 165 y 200 mm. Su peso es de unos 90 kilos en el aire, y en el agua se neutraliza por medio de unas bolsas de aire que hay en las aletas, las cuales también se utilizan para su sustentación en el agua. El control de los actuadores, el impulsor y el lastrado se realizan por medio de un joystick, para que, de esta forma, se pueda hacer un manejo inicial básico y con ello, observar su funcionamiento y maniobrabilidad en el agua. Para ello también se cuenta con algunos sensores, los cuales envían sus lecturas a un computador en la superficie, por medio de un par de fibras ópticas, para almacenar los datos y analizar posteriormente el comportamiento del robot.

2.1 Sensores utilizados en el REMO I

En robot REMO I integra varios tipos de sensores que son

necesarios para el control de la posición y orientación del anillo impulsor y para el control de actitud de la navegación, así como sensores para la detección de condiciones anormales de funcionamiento y una cámara de visión.

El control de la posición y orientación del anillo impulsor de la plataforma paralela se basa en la medición del desplazamiento de los accionamientos lineales que emplean encoders ópticos, y el procesamiento algorítmico de estos desplazamientos articulares mediante la cinemática inversa y directa.

Para el control de actitud (navegación), el robot incorpora una unidad inercial IMU, que permite estimar los ángulos de cabeceo, balanceo y guiñada (pitch, roll, yaw) y sus respectivas velocidades, en base a giróscopos de estado sólido. En la IMU, se dispone de una brújula electrónica. Este sensor magnético permite compensar el error de medición del algoritmo que estima los ángulos que dan la actitud del robot. Para tener un valor estimado de la profundidad se cuenta con un sensor de presión absoluta. Los sensores de presión diferencial indican el valor de la presión interna de la cabina con respecto a la del agua, y la presión de las bolsas de flotación ubicadas en las aletas para evitar un exceso de presión en las bolsas del sistema de lastrado.

Los detectores de condiciones anormales determinan si existe una alarma en el REMO I. En este caso se utiliza un sensor de temperatura, basado en un semiconductor; un interruptor de presión, para avisar si falta poco para vaciarse las bombonas de aire de suministro al circuito neumático, y el detector de intrusión de agua, que es un sensor de nivel óptico. Las otras alarmas se activan mediante la detección de los niveles de medición por medio del software. En la tabla 1 se presenta un resumen de los sensores utilizados en el REMO I.

Tabla 1. Resumen de los tipos de Sensores del REMO I

Tipo de sensor	Fabricante	Modelo
IMU	Microinfinity	MI-A3350M
Posición de los actuadores	Baumer Electric	BDK16-24K 1024-5-4
Velocidad y par del impulsor	Control Techniques	Eb-203
Detector de líquido	Honeywell	LLE102000
Temperatura	Nat. Semiconductor	LM335
Presión absoluta. (Profundidad)	Keller	PAA21
Presión diferencial.	Honeywell	24PCFFM1D
Presión diferencial	Honeywell	24PCGFM1D
Interruptor Presión	Isis Fluid Control	F4S
Brújula magnetorresistiva	Honeywell	HMC1001 HMC1002
Cámara IP	Grandtec	Grand IP

Es de notar que para una instrumentación más completa se necesitará sensores sónares. Este tipo de sensor es necesario para la detección de objetos y la determinación de la posición y velocidad del robot respecto al fondo marino. Para futuras investigaciones, se tiene previsto la utilización de dispositivos sónares.

2.2 Elementos finales de control

Los elementos finales de control son los actuadores lineales, el impulsor y las válvulas solenoides. Cada actuador lineal es una estructura alargada de unos 750 mm en estado de reposo y sección interna circular, la cual incluye: un tornillo a bolas

acoplado a una polea, un husillo y un émbolo. En el lado externo del actuador, y acoplado por medio de una correa a la polea, se encuentra un motor de corriente continua de 72 W, un reductor y un codificador de posición. La capacidad de desplazamiento del actuador es de 350 mm. Debido a la reducción del motor y el acople husillo - tornillo sinfín, el actuador transmite una gran fuerza en su extremo, además de una alta precisión en el movimiento a realizar. Estos movimientos son lineales y se coordinan con el resto de los actuadores de acuerdo con las trayectorias generadas de cada uno de ellos a través de la solución de la cinemática inversa de la plataforma Stewart – Gough (Almonacid, 2002). De esta manera se obtiene la posición deseada del impulsor (efector) con respecto a la cabina (base).

La unión de los actuadores con la base se hace mediante juntas universales, y la de los actuadores con el efector se realiza mediante juntas esféricas. Esto permite movimientos de seis grados de libertad entre la base y el efector (Tsai 1999).

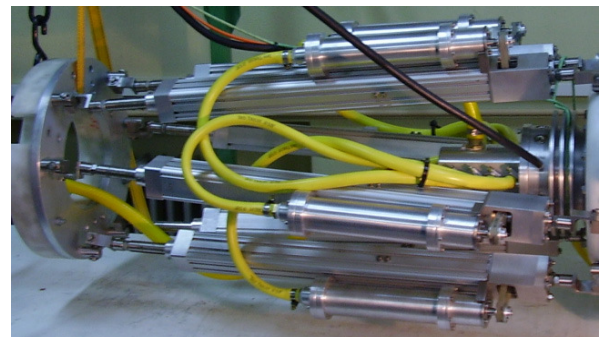


Figura 3. Plataforma paralela y sus actuadores lineales

El impulsor consiste en un motor sin escobillas de tres fases, acoplado a una hélice. El conjunto podrá girar a una velocidad máxima de 3000 rpm con un par máximo de 3,1 N-m que representa una potencia mecánica máxima de 974 W. Trabaja con un controlador con salida modulada en ancho de pulsos, y éste a su vez, recibe la señal de manejo por medio de una salida analógica de la tarjeta de control que está en el REMO I.

Otros elementos finales de control, son las válvulas solenoides del circuito neumático, las cuales se utilizan para el control de la presurización de la cabina del REMO I y el llenado o vaciado de los tanques de lastre que regulan la flotabilidad.

Para fijar la orientación y posición del timón, la velocidad del impulsor y el llenado o vaciado de los tanques de lastre en modo manual, se utiliza un joystick comercial. Con esto se obtiene un dominio completo sobre la navegación en el que el software desarrollado ofrece una interfaz intuitiva y sencilla de manipular.

3. ESTRATEGIA DE CONTROL

Para el control de robots submarinos se han desarrollado varias arquitecturas de control (Valvanis, et al., 1997), (Wernli et al., 1999), (Del Amo, 2002), (Nakamura y Savant, 1992), (Whitcomb, et al., 1998). Cada una puede presentar sus ventajas y desventajas según el tipo de aplicación. En el caso del REMO I, se escogió una arquitectura tipo cliente - servidor, en la cual un computador personal (cliente), ubicado en la superficie, es el que solicita el envío de datos desde una tarjeta de control multitejes y multifuncional (servidor), la cual está colocada en el

REMO I, y es la que se encarga de controlar y coordinar los movimientos de los actuadores a bajo nivel, tomar las lecturas de las señales analógicas y digitales, y recibir los comandos de control digital.

Este tipo de arquitectura se adapta bien corresponde a la de un sistema teleoperado experimental, ya que en el computador ubicado en la superficie se ensayarán diversas configuraciones y algoritmos de control de alto nivel para ser aplicados al prototipo. Por otro lado, hay otros elementos independientes en el REMO I, que actúan de servidores tales como: la unidad de medición inercial (IMU), que detecta los ángulos y velocidades angulares de cabeceo, balanceo y guiñada de la cabina del robot, y la cámara de observación, que se usa para mostrar, en el computador de la superficie, las imágenes obtenidas en el agua. En la figura 4, se muestra el diagrama de bloques de la arquitectura de control del robot submarino REMO I.

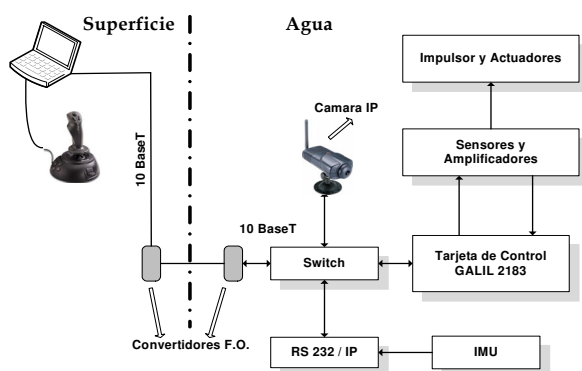


Figura 4. Arquitectura de control del REMO I

Como ya se ha mencionado, el operador envía comandos a los actuadores del robot al través de un joystick comercial. El computador personal realiza funciones de lectura, análisis y procesamiento del flujo de datos provenientes del REMO I, y presenta las mediciones obtenidas, las imágenes submarinas y los gráficos de comportamiento del movimiento del robot por medio de una interfaz de usuario. En la tarjeta de control a bordo del REMO I, se cierran los lazos internos de control de los actuadores y del impulsor.

3.1 La Interfaz de Usuario

El programa de control del vehículo submarino robotizado REMO I se hizo con la intención de obtener una interfaz de usuario que permita la visualización del estado del prototipo, y que se comunique eficientemente con la tarjeta de control, para obtener respuestas rápidas de las acciones que se realizan.

En la interfaz de usuario aparecen las medidas que registra el REMO I. Además el usuario tiene a su disposición una ayuda de todas las funcionalidades del sistema (variables de control, estado de los sensores, actuadores, etc).

En la Figura 5 se presenta la interfaz de usuario del REMO I. A través de la interfaz es posible conocer el estado general de robot, es decir los datos de actitud, la posición leída y calculada de los actuadores lineales, velocidad del impulso, las presiones internas y de los tanques de lastre, los valores indicados por la brújula electrónica, el termómetro y las alarmas. Algunas de las acciones de control que pueden realizarse desde el panel del usuario son: fijar el tiempo de recopilación de los datos, habilitar el control de lastrado, seleccionar el modo de control de lastrado

y fijar el valor deseado en el control de profundidad., etc.

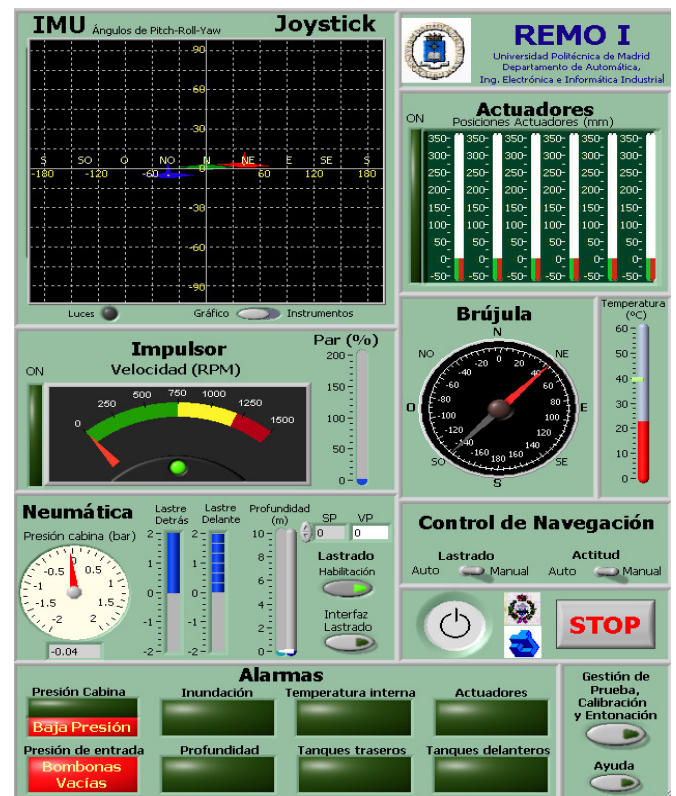


Figura 5. Interfaz de usuario del REMO I

3.2 Control mediante el joystick.

Antes de hablar de la relación entre el movimiento del joystick y, los movimientos del efector y el robot submarino, se utilizará el modelo de la figura 6 para indicar los sistemas de referencia de la cabina del robot, del efector con respecto a la cabina y del fondo marino. Se estableció una relación desacoplada entre los movimientos del joystick y los movimientos angulares del efector que producirán los giros y desplazamientos del REMO I. En la Figura 7 se muestra la correspondencia de movimientos del joystick que se han asignado, considerando los sistemas de referencia de la cabina del submarino presentadas en la Figura 6.

Figura 6. Sistemas de referencia utilizados en el REMO I.

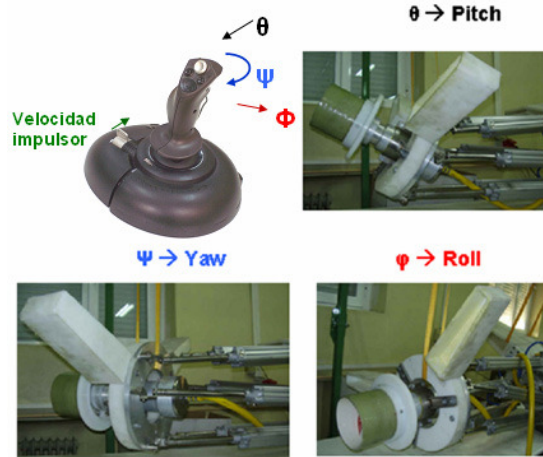


Figura 7. Movimientos de orientación del joystick y su equivalencia con los movimientos del efector y los desplazamientos a obtener en el movimiento del REMO I.

A través de uno de los botones del joystick, también es posible seleccionar el modo de movimiento del efector; esto es, realizar sólo movimientos de desplazamiento o bien, desplazamientos combinados con giros logrando deformar la estructura y mejorar así la eficiencia de los mismos.

3.3 El control de la plataforma Stewart – Gough

Una parte importante de este trabajo es el cálculo de la cinemática inversa y las equivalencias que han sido dadas entre los movimientos del joystick y el de la plataforma Stewart – Gough. Para obtener la longitud de cada actuador, se plantea el sistema de referencia de la figura 8 (Almonacid 2002), en la que se observa el dibujo de una plataforma paralela con seis actuadores lineales, en donde se sitúa la base en la parte inferior y el efector en la superior. En ella se fijan los puntos de unión del anillo de la base y los del efector. Estos puntos se ubican según el ángulo σ el cual corresponde al menor ángulo entre dos juntas contiguas, y en este caso $\sigma = 40^\circ$. Los ángulos de separación de cada junta en la base corresponden a la Figura 9. El sistema coordinado a utilizar, es el de la base con respecto al efector de las Figuras 6 y 8.

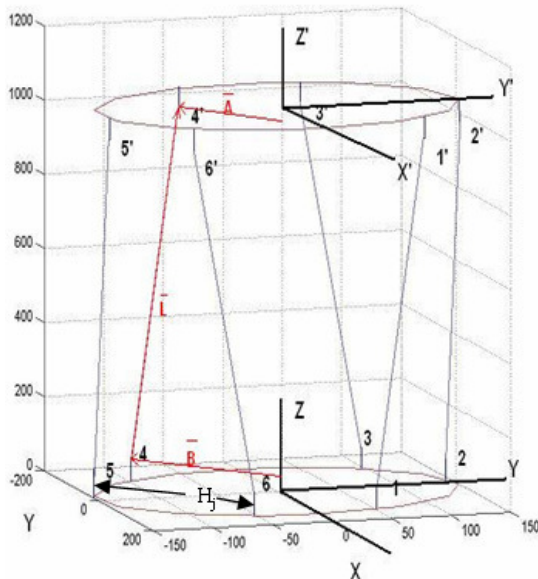


Figura 8. Ubicación de puntos en la plataforma paralela Stewart – Gough.

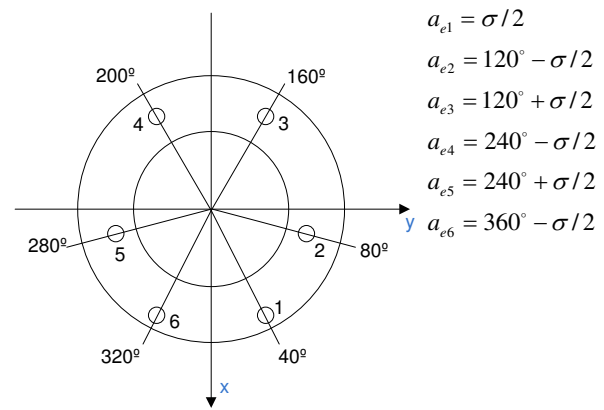


Figura 9. Ubicación de los puntos de unión en la base de la plataforma S-G

Si se asume que el centro de la base está en el origen de coordenadas, la ubicación de cada uno de los 6 puntos que corresponde al extremo de un actuador, está a una altura correspondiente a la longitud de las juntas, es decir, H_j . Por lo tanto, las coordenadas de inicio en cada actuador n corresponden a:

$$P_{bn} = [R_b \cos(a_{bn}), R_b \sin(a_{bn}), H_j] \quad (1)$$

Donde:

$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

R_b corresponde al radio de la base.

H_j es la altura de las juntas.

A_{bn} son los ángulos de ubicación de las juntas en la base.

En el caso del efector se procede de forma similar. Los ángulos de separación en el anillo son los de la figura 10.

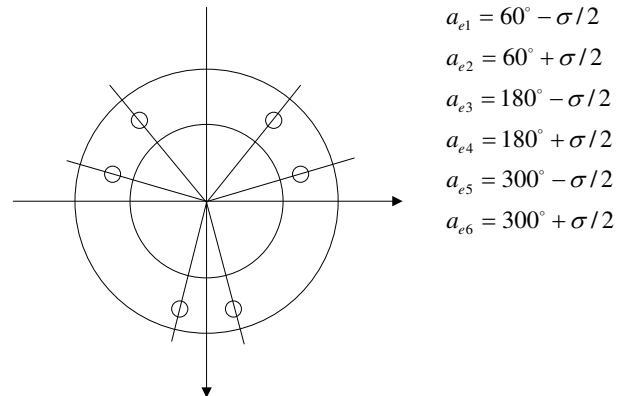


Figura 10. Ubicación de los puntos de unión en el efector de la plataforma Gough-Stewart

Para hallar el punto central en el efector, se procedió a hacer los movimientos en x , y , z , y la rotación respectiva según los ángulos de Euler, ya que esto permite obtener una orientación más precisa. La rotación A_{ef} se obtiene al hacer el producto de las matrices de cada rotación.

$$A_{ef} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

α es la rotación con respecto al eje Z.
 β es la rotación con respecto al eje X.
 γ es la rotación con respecto al eje Z.

La posición de cada punto en la parte final del actuador, se determina según la ubicación del punto del centro del efector $[x, y, z]$, la matriz de rotación, la longitud de las juntas H_j y la ubicación de los puntos en el anillo, por lo tanto:

$$\mathbf{P}_{en} = [x, y, z] + \mathbf{A}_{ef} [R_e \cos(a_{en}), R_e \sin(a_{en}), -H_j] \quad (3)$$

Donde:

$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$
 R_e corresponde al radio del efector.
 H_j es la altura de las juntas.
 A_{en} son los ángulos de ubicación de las juntas en el efector.

En consecuencia el desplazamiento que deberá ejercer cada actuador en el movimiento del efector es la distancia vectorial entre la posición final de cada actuador y la posición inicial del mismo, menos la longitud en reposo, por tanto:

$$L_n = \sqrt{(\mathbf{P}_{en} - \mathbf{P}_{bn})(\mathbf{P}_{en} - \mathbf{P}_{bn})} - L_0 \quad (4)$$

Donde:

$n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$
 L_0 es la longitud de reposo.

El movimiento de la plataforma Stewart – Gough se coordinará, según los valores proporcionados por el joystick (combinando los datos de la palanca principal, del control Z y de dos de los botones situados en la propia palanca). De esta manera se genera los seis grados de libertad de la plataforma paralela.

Los ángulos de orientación del timón, referidos al sistema de coordenadas de la plataforma Stewart – Gough, se obtienen al encontrar una equivalencia entre los movimientos del joystick y los ángulos de Euler. Esta equivalencia se determina de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Rot } x \equiv \theta &\rightarrow \alpha = 0, \quad \beta = \theta, \quad \gamma = 0 \\ \text{Rot } y \equiv \varphi &\rightarrow \alpha = \pi/2, \quad \beta = \varphi, \quad \gamma = -\pi/2 \\ \text{Rot } z \equiv \psi &\rightarrow \alpha = 0, \quad \beta = 0, \quad \gamma = \psi \end{aligned}$$

Los movimientos de orientación y desplazamiento del efector, se pueden referir al sistema de coordenadas en donde se ubica el robot, de esta forma se obtienen equivalencias de $x_R = -z_{SG}$; $y_R = -y_{SG}$; $z_R = -x_{SG}$, donde el sufijo R corresponde a la dirección de movimiento del robot, y el sufijo SG corresponde a la base del sistema utilizado para la plataforma Stewart – Gough.

3.4 Generación de trayectorias

La generación de trayectorias es una parte importante para el control de la plataforma Stewart - Gough, ya que se debe garantizar que los actuadores se moverán armónica y suavemente para orientar y desplazar el efector con respecto a la cabina evitando las singularidades (Tsai, 1999).

Tal como se ha dicho, la posición y orientación del efector es enviada a través del joystick. Para evitar discontinuidades en la

trayectoria es necesario generar puntos intermedios entre dos puntos enviados desde el joystick. Si bien existen varias propuestas como la dada por Almonacid (2002), en el REMO I se ha utilizado el modo de seguimiento de la tarjeta de control Galil, para fijar la trayectoria de cada actuador.

El algoritmo de generación de puntos, trabaja de la siguiente manera: Cuando se detecta que hay un cambio en la posición del joystick, entre la posición anterior y la actual, se genera un punto situado cerca del inicio (a una distancia corta, prefijada en el software) en dirección a la posición donde se encuentra la palanca del joystick. A continuación se calcula la cinemática inversa, y en base a esto, se obtienen las posiciones, velocidades y aceleraciones para cada actuador, que se envían a la tarjeta de control. Este procedimiento se repite tantas veces sea necesario, hasta que el último punto generado, coincida con el de la posición del joystick. Como consecuencia, los ángulos y desplazamientos del efector se pueden dividir en varios puntos intermedios y equidistantes, entre el inicio y el final, y para que el efector no pase por un punto singular, se prefija los valores máximos de los ángulos y los desplazamientos en el joystick, para que los valores a calcular se sitúen dentro de un espacio de trabajo limitado.

Se define q_j como un vector de 6 elementos que indica los ángulos y desplazamientos enviados a través del joystick; q_t como el vector que contiene los ángulos y desplazamientos generados; q_{t-1} como el vector que contiene los ángulos y desplazamientos generados en un tiempo de muestreo anterior, y k_r como un índice que determina la resolución máxima entre dos puntos consecutivos, se puede determinar que:

$$q_t = q_{t-1} + k_r \frac{q_j - q_{t-1}}{\max(q_j - q_{t-1})} \quad (5)$$

La ecuación se aplica hasta que haya una convergencia entre q_j y q_t .

Los valores de las velocidades y aceleraciones individuales de cada actuador tendrán una relación menor con respecto al actuador que tenga el mayor recorrido y las velocidades y aceleraciones máximas prefijadas en el software. Si \mathbf{p} es el vector de las longitudes de cada actuador, \mathbf{v} el de las velocidades y \mathbf{a} el de las aceleraciones, entonces:

$$\mathbf{v} = v_{\max} \frac{\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{t-1}}{\max(\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{t-1})} \quad (6)$$

$$\mathbf{a} = a_{\max} \frac{\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{t-1}}{\max(\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_{t-1})} \quad (7)$$

Estas ecuaciones no se aplicarán en el caso de que las posiciones anteriores y actuales sean las mismas. De esta forma, se asegura que los actuadores llegarán simultáneamente a cada punto. Estos datos se envían a la tarjeta de control que genera la trayectoria. En el caso de cambiar el punto de final, antes de que el efector llegue al destino previo, la nueva trayectoria partirá desde el punto donde se hizo el último cálculo, hasta el nuevo punto calculado en dirección a la nueva trayectoria.

3.5 El control de presurización y lastrado.

El control de lastrado se utiliza para compensar la relación peso volumen del REMO I, de manera que éste se mantenga con una flotabilidad neutra en el agua (Wolf, 2003). El sistema de lastrado está compuesto por dos bombonas de aire comprimido, un circuito neumático y cuatro cavidades con sus bolsas elásticas de aire, dos en las aletas delanteras y dos en las traseras.

Las bombonas se colocan en la parte exterior del REMO I, cada una tiene una capacidad para almacenar 5 litros de aire a una presión de 200 bares, y se conectan a una válvula con un regulador de presión que, una vez abierta, mantiene una presión de estable de 8 bares. En la entrada del circuito neumático se encuentra un interruptor de presión, que envía una señal de alarma cuando la presión baja de 5 bares.

El circuito neumático se controla por software. La presión de la cabina se regula a un valor de entre 0,3 y 0,4 bares mediante un algoritmo de control on-off. En el caso del control de flotación, éste se controla mediante unos botones situados en la palanca del joystick.

El circuito neumático presenta algunas protecciones en caso de fallos. En primer lugar, si deja de llegar el suministro eléctrico, aumentará la presión interna de la cabina, y además se llenarán las bolsas de aire. De esta forma se mantendrá la cabina y las cavidades de las aletas presurizadas, para que el REMO I salga a flote. Por otro lado, para que no haya una presión excesiva en la cabina y las bolsas de aire, se cuenta con válvulas de seguridad.

El sensor de presión absoluta se utiliza para medir la profundidad a la que se encuentra el vehículo submarino, y con ello se cierra el lazo de control de profundidad, cuando se selecciona el control en modo automático.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para el control de cada actuador se utilizó un algoritmo PD (proporcional – derivativo). Para el cálculo de las constantes se utilizó el método de compensación de polos y ceros, y la fijación de un margen de fase según Álvarez (1997). Luego se utilizó el algoritmo de generación de trayectorias y el cálculo de la cinemática inversa. En la Figura 11 se observan el comportamiento de las longitudes calculadas de los actuadores en función del tiempo, y en la Figura 12 se muestran las longitudes leídas en cada actuador, en una prueba del robot realizada en un estanque. En las figuras, se podrá observar el comportamiento similar entre los desplazamientos obtenidos y los desplazamientos generados. Puede verse además, que para un movimiento brusco calculado en un actuador, el resultado es un movimiento un poco más suave (véase los movimientos en 1740, 1760 y 1815 segundos).

En cuanto a los movimientos de la dirección a recorrer por el REMO I, se encontró que éstos respondían de acuerdo a las órdenes del joystick de manera independiente, y que la velocidad del impulsor también influye en la respuesta. Una muestra de esto se puede observar en la Figura 13, en la que se hace un control de guiñada, donde el balanceo y el cabeceo permanecen fijos cerca del valor 0.

Figura 11. Longitudes calculadas de los actuadores según el movimiento del joystick y la cinemática inversa.

Figura 12. Longitudes leídas en cada actuador durante la navegación en el mismo intervalo de la figura 11.

En cuanto a la inmersión y emersión del REMO I, por medio de los tanques de lastre, se pudo observar una respuesta lenta al aplicar un impulso de presión de un segundo de duración a una profundidad de 6,5 metros. Los resultados mostrados en estas figuras se utilizarán para el desarrollo del modelo del REMO I y el control a lazo cerrado. En la Figura 14 se muestra una fotografía del robot submarino REMO I realizando pruebas de navegación.

Figura 13. Cambio de rumbo del REMO I al variar la velocidad del impulsor desde 820 RPM a 1300 RPM y mover la palanca del joystick.



Figura 14. El REMO I haciendo una emersión, mediante una maniobra de cabeceo.

5. CONCLUSIONES

Después de realizar el desarrollo de este vehículo submarino robótico de estructura paralela, se puede afirmar que el funcionamiento de éste cumplió sus expectativas satisfactoriamente. La utilización de una plataforma Stewart – Gough para hacer los movimientos del impulsor, muestran una forma novedosa de navegación que permite una gran flexibilidad de movimientos dentro del agua.

El control de teleoperación manual para realizar los movimientos de navegación resultó exitoso, ya que los tiempos de respuestas fueron lo suficientemente rápidos, como para manejar al robot sin problemas. Esto es una buena señal para la implementación de un control de navegación a lazo cerrado, en el que se espera que el robot responda bien ante perturbaciones y a la planificación de movimientos para esquivar obstáculos.

En el caso del control de lastrado, se encontró que el tiempo de respuesta fue demasiado lento, lo cual significa que para el uso del control de inmersión o emersión se deberá utilizar algoritmos que permitan optimizar la respuesta y el uso eficiente del aire comprimido. De todas formas, en principio, el control de lastrado se utilizará solamente para la compensación de la flotabilidad del REMO I en el agua, y la navegación se hará con los movimientos de la plataformas Stewart – Gough y el impulsor.

En cuanto a la hidrodinámica, se encontró que este prototipo opone mucha resistencia al agua, y es por ello que las velocidades de navegación alcanzadas fueron bastante bajas. En el diseño inicial no se consideró esto como un fin a perseguir, ya que la propuesta se centró en la utilización de la plataforma Stewart – Gough. Sin embargo, para los proyectos a futuro, se tiene contemplado mejorar la forma hidrodinámica del robot, para que el vehículo submarino navegue con una mínima resistencia al agua.

Es mucho lo que se puede hacer a partir de este prototipo de vehículo submarino robótico de estructura paralela, ya que es el primero que se implementa con una plataforma Stewart - Gough.

Para empezar, la realización de un estudio de la navegación para comprobar el comportamiento para cada grado de libertad del vehículo submarino robótico de estructura paralela y la combinación de ellos, junto a la influencia de la velocidad del impulsor con miras a encontrar un modelo matemático es un

primer paso importante en el estudio de la navegación para este tipo de robots de geometría variable.

El estudio y análisis de la implementación de algoritmos de control multivariable para la navegación precisa del REMO I, es un reto importante, ya que combina la parte de control de una plataforma Stewart - Gough, con el control de navegación y la búsqueda de los algoritmos que mejor se adapten para estas investigaciones.

Otra línea importante consiste en el estudio del control de lastrado en combinación con el control del timón de este vehículo submarino robótico. Por un lado, en la actualidad hay muy pocos robots submarinos que utilizan un sistema de control de lastre neumático. Por otro lado, combinar los movimientos de ascenso y descenso de este tipo de robot, junto con el sistema de lastrado, incrementará las posibilidades para mejorar la eficiencia y los movimientos de navegación en estos vehículos robóticos.

Otras líneas de investigación que podrán implementarse con este prototipo, es el estudio de la navegación con retroalimentación mediante visión óptica y acústica. Esto se debe a que para visión lejana en el agua, y según el grado de turbidez de ella, las cámaras ópticas no pueden captar imágenes para distancias lejanas. Es por ello que el uso de sistemas de visión acústica en combinación con la óptica tendrá mucho campo de búsqueda de soluciones para estos robots submarinos, de manera de perfeccionar algoritmos que permitan esquivar obstáculos, realizar movimientos de navegación en 3D, hacer estudios del fondo marino, y planificar misiones para que éstas puedan ser realizadas por vehículos submarinos autónomos.

El estudio hidrodinámico de este tipo de robot, junto a la búsqueda de la forma más eficiente para su navegación es de suma importancia para encontrar soluciones en el desarrollo de un robot submarino autónomo con este tipo de plataforma paralela.

Debido a la flexibilidad que ofrece la plataforma Stewart - Gough, sería interesante hacer un estudio de la navegabilidad del REMO I sin la utilización de un impulsor, sino, al igual que un pez o un cetáceo, se obtengan los movimientos más adecuados para hacer navegar al robot combinando el control de lastrado con el movimiento de las aletas traseras. De la misma manera sería oportuno buscar soluciones eficientes para dotar de mayor autonomía de robots submarinos autónomos. Si se utilizara al REMO I como vehículo planeador en el agua (Grady, 2005), en el que con un pequeño movimiento de las aletas y el control de lastre, se lograría que pueda navegar de un sitio a otro sin necesidad del impulsor y con un consumo de energía sumamente reducido.

Otros trabajos futuros podrán ir en la línea de diversas aplicaciones a implementar: en el estudio geológico submarino, la investigación del comportamiento de la fauna acuática, el empleo de este tipo de robot para mantenimiento de estructuras submarinas, el estudio del comportamiento de estos vehículos ante corrientes laterales, el desarrollo e implementación de interfaces hápticas, y un sinnúmero de ideas que podrían ser utilizadas para este tipo de robots.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CICYT-REMO

(VEM 2003-20017) y el Proyecto ROBOCITY 2030 de la Comunidad de Madrid, para el desarrollo de robots submarinos para el estudio de desastres marinos, y la beca asignada a D. Cesar Álvarez, por La Universidad del Zulia (Venezuela).

REFERENCIAS

- Almonacid, M. (2002). *Modelado, Simulación y Control del Movimiento de Robots Trepadores Paralelos*. Tesis Doctoral, Universidad Miguel Hernández, Escuela Politécnica Superior de Elche. pp. 75.
- Álvarez, C. (1997). *Método Analítico para la Entonación Rápida de un Controlador PID para Plantas de primero y segundo orden con tiempo muerto*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela.
- Bohm, H. and V. Jensen. (2001). *Introduction to Underwater Technology & Vehicle Design*. Marine Advanced Technology Education Center.
- Cavallo, E. (2003). *Parallel Robotic System Design for the Steering and Guidance Mechanism of an Autonomous Underwater Vehicle*. Ph.D. Thesis in Mechanics and Machine Design, Università Degli Studi di Genova.
- Cavallo, E. and Michelini, R.C. (2004). *A Robotic Equipment for the Guidance of a Vectored Thruster AUV*. 35th International Symposium on Robotics ISR 2004. pp. 1 – 6.
- Chantler, M.J., D.B. Lindsay, C.S. Reid and V.J.C. Wright (1994). *Optical and acoustic range sensing for underwater robotics*. 'Proceedings Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.' Vol: 1., pp 205 – 210
- Dario, P., R. Dillman and H. Christensen, (2004). *EURON Research Roadmaps*. European Robotic Research Network. pp. 85.
- Del Amo, J.F. (2002) *Concepción de una arquitectura sensorial para un robot subacuático*. Trabajo final de carrera. Universidad Politécnica de Cartagena. ETSII.
- Fossen, T.I. and S.P. Berge. (1997). *Nonlinear Vectrial Backstepping Design for lobal Exponential Tracking of Marine Vessels in the Presence of Actuator Dynamics*. Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control. pp. 4237 – 4242.
- Grady, J. (2005). *Underwater Gliders: Dynamics, Control and Design*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Princeton University.
- Le Page, Y.G. and K.W.Holappa (2000a). *Simulation and Control of an Autonomous Underwater Vehicle Equipped with a Vectored Thruster*. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. pp. 2129 – 2134.
- Le Page, Y.G. and K.W.Holappa. (2000b). *Hydrodynamics of an Autonomous Underwater Vehicle equipped with a Vectored Thruster*. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. pp. 2135 – 2140.
- Morel, Y. and A. Leonessa. (2003). *Adaptive Nonlinear Tracking Control of an Underactuated Nonminimum Phase Model of a Marine Vehicle Using Ultimate Boundedness*. Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. pp. 3097 -3102.
- Nakamura, Y. and S. Savant (1992). *Nonlinear tracking control of autonomous underwater vehicles*. In Proceedings of IEEE ICRA 1992 Vol. 3 pp A4-A9.
- Saltarén, R., R. Aracil and V. García (2004). *Underwater robot of variable geometry based on the Stewart-Gough parallel platform: Conception and hydrodynamic modeling*. Automation for the Maritime Industries. Madrid.
- Tsai, L.W. (1999). *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. John Wiley & Sons, Inc.
- Valvanis, K., D. Gracanin, M. Matijasevic, R. Kolluru, and G. Demetriou (1997). *Control Architectures for Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE Control Systems Magazine. Vol 17. pp. 48 – 64.
- Wernli, R. (1999). *AUV'S The Maturity of the Technology*. Space and Naval Warfare Center. San Diego U.S.A. pp. 1 – 7.
- Wolf, M. (2003). *The Design of a Pneumatic System for a Small Scale Remotely Operated Vehicle*. Department of Mechanical Engineering of Massachusetts Institute of Technology.