

Diseño de AUV. Arquitectura de hardware y software

Alain Martínez^{a,b,*}, Yidier Rodriguez^a, Luis Hernández^a, Carlos Guerra^a, Jorge Lemus^a, Hichem Sahli^b

^aUniversidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV), Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática y Sistemas Computacionales, Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), Carretera a Camajuaní Km 5½, CP 54830, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

^bVrije Universiteit Brussel (VUB), Dept. of Electronics and Informatics (ETRO), Pleinlaan, 2, B-1050 Brussels, Belgium

Resumen

El presente documento discute la estrategia bajo la que fueron concebidas la arquitectura de hardware y software para el prototipo de vehículo autónomo: *HRC-AUV*, así como la selección de los elementos fundamentales que las componen. El diseño obtenido pondera la sencillez y el desarrollo en condiciones de bajo costo, factores útiles a investigadores que comienzan su actividad en este campo. El trabajo resume las prestaciones que brindan dichas estructuras y las pruebas preliminares de operatividad a que han sido sometidas para demostrar la validez de su empleo en la explotación de un *AUV*. De igual forma se presentan los modelos dinámicos linealizados de la planta, utilizados en la sintonía de los lazos de control. La respuesta de dichos lazos y en general del *HRC-AUV* navegando en el océano, es presentada a través de los resultados obtenidos en varias pruebas experimentales.

Copyright © 2013 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

AUV, arquitectura de hardware, arquitectura de software.

1. Introducción

El océano y el subsuelo bajo este proveen alimentos, vías de comunicaciones y recursos energéticos a un buen número de seres humanos, además de ejercer una fuerte influencia en la regulación del clima del planeta. Es por estos motivos que para facilitar el estudio de este medio y aprovechar sus recursos han surgido una variedad de vehículos subacuáticos entre los que se encuentran los *AUV* (siglas del término en inglés: *Autonomous Underwater Vehicle*).

Los *AUVs* o por su definición en castellano “Vehículos Submarinos Autónomos” son vehículos sumergibles que portan su propia fuente de energía, diversos sensores y una unidad de cómputo ejecutando software y soluciones de control que les permiten desarrollar misiones sin la intervención humana. En particular la navegación, localización y mapeo destacan como tópicos de interés para investigadores en robótica submarina. Los *AUV* están basados en dos tipos de vehículos:(a) vehículos tipo crucero de forma cilíndrica alargada, optimizados para largos desplazamientos (Breivik and Fossen, 2009) y (b) vehículos

de alta capacidad de maniobra equipados con manipuladores para misiones de intervención (*I-AUV*) (Sanz et al., 2010).

La tecnología de los *AUVs* ha avanzado hasta contar en la actualidad con un significativo número de sistemas operacionales, de diversos tamaños, propósitos y configuración, cubriendo un amplio rango de aplicaciones (Batlle et al., 2004). Varios proyectos de *AUV*, tales como las series “REMUS” de la firma “HYDROID” (actualmente parte de la “Kongsberg Maritime”) y “HUGIN” de la “Kongsberg Maritime” han madurado hasta llegar a ser productos comerciales de alta fiabilidad y prestaciones. No obstante es válido señalar que los costos de adquisición y explotación de estos productos son elevados. Además, las posibilidades de modificación para acometer tareas distintas a las originales para las que fueron concebidos requiere la intervención normalmente de la firma desarrolladora, ya que la arquitectura de hardware y software así como las estrategias de control son cerradas al usuario final.

En Cuba el Centro de Investigaciones Hidrográficas ha desarrollado varios prototipos de vehículos para la investigación marina, pero ninguno ha contado con capacidades autónomas. Es por este motivo que dicho centro solicitó la cooperación de los investigadores del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP), con el objetivo de dotar de estas capacidades a uno de sus vehículos. De esta demanda surge el proyecto *HRC-AUV*, el mismo tiene como meta desarrollar un *AUV* de bajo costo capaz de operar en misiones de supervisión y exploración

*Autor en correspondencia. Tel. 053-42-281632

Correos electrónicos: amguardia@uclv.edu.cu (Alain Martínez), yidier@uclv.edu.cu (Yidier Rodriguez), luishs@uclv.edu.cu (Luis Hernández), ceguerra@uclv.edu.cu (Carlos Guerra), jlemus@uclv.edu.cu (Jorge Lemus), hsahli@etro.vub.ac.be (Hichem Sahli)

en la plataforma marina. A lo largo de las distintas fases del proyecto los investigadores de *GARP* han laborado en el diseño e implementación de la arquitectura de hardware y software; el modelado analítico del sistema y el diseño de las estrategias de control así como del sistema de navegación del vehículo. Todas estas tareas se han realizado de acuerdo al marco teórico actual y haciendo énfasis en la reducción de los tiempos y costos de desarrollo, de forma tal que permitan a investigadores en la misma situación replicar los resultados o enriquecerlos.

El presente documento brinda una descripción general de la estrategia de concepción del *HRC-AUV* (sección 2), para posteriormente centrarse en la implementación de la arquitectura de hardware del vehículo (sección 3), así como la descripción del software a los distintos niveles de dicha arquitectura (sección 4). De igual forma se plantean las soluciones de control empleadas en el diseño del autopiloto, encargado de mantener el rumbo y la profundidad durante el cumplimiento de misiones (sección 5). Por último se realiza una sencilla prueba de seguimiento de trayectoria para evaluar el desempeño general alcanzado (sección 6). El documento finaliza (sección 7) con un grupo de conclusiones que marcan la línea de trabajo actual del proyecto *HRC-AUV*.

2. Estrategia de concepción del *HRC-AUV*

Desarrollar un vehículo autónomo implica un grupo de retos significativos para cualquier equipo de investigación. En el caso del *HRC-AUV*, tras el análisis del marco teórico sobre el tema y la evaluación de los resultados alcanzados por otros investigadores en el mismo campo se llegó a un grupo de directrices que rigen los objetivos a alcanzar. Las mismas son:

- Diseño de un vehículo capaz de realizar los amplios desplazamientos requeridos por las labores de supervisión y exploración de la plataforma marina.
- Método de navegación auto-contenido, con la menor dependencia posible de factores externos.
- Disponibilidad de varios modos de trabajo que le permitan al *AUV* el cumplimiento de diferentes tareas.
- Las estrategias de control para el prototipo deberían estar basadas en diseños clásicos de alta fiabilidad.
- Arquitectura de hardware sencilla y basada en dispositivos de fácil adquisición y mantenimiento.
- El software a los distintos niveles de la arquitectura de hardware ponderará la funcionalidad, con un carácter modular que permita su rápido despliegue y puesta a punto.

2.1. Descripción mecánica del *HRC-AUV*

El diseño mecánico y la construcción naval del *HRC-AUV* corrió a cargo del Centro de Investigaciones Hidrográficas. Los investigadores se trazaron como meta diseñar un vehículo altamente simétrico capaz de desarrollar los amplios desplazamientos requeridos. El resultado final, es un vehículo de forma cilindro-cónica alargada, con una estructura física similar al

HUGIN 4500 (Hegrenae et al., 2007b) o el *STARFISH* (Sange-kar et al., 2008). El sistema de actuadores está compuesto por un propulsor y dos timones de control para rumbo y profundidad, ubicados todos en la parte trasera del vehículo y accionados eléctricamente. El diseño del vehículo le permite operar de forma segura hasta profundidades de 10 m. La descripción de las variables físicas más significativas puede ser apreciada en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen de los parámetros físicos del *HRC-AUV*

Parámetro	Descripción	Valor
m	masa	4094, 56 kg
W	peso	40, 208 kN
u_0	velocidad crucero	1, 9 m/s
n	revoluciones del propulsor	52, 36 rad/s
L	largo	9, 46 m
R	radio	0, 4 m
I_{xx}	momento de inercia	450, 1 kgm ²
I_{yy}	momento de inercia	21010, 4 kgm ²
I_{zz}	momento de inercia	20816 kgm ²
I_{xz}	producto de inercia	275, 44 kgm ²
BG	distancia entre el centro de flotabilidad (CF) y el de gravedad (CG)	[0, 0, 22 mm] ^T
δ_T	ángulo de flexión del timón de rumbo	± 30°
δ_E	ángulo de flexión del timón de profundidad	± 30°

2.2. Método de navegación seleccionado

Las soluciones de navegación mayormente empleadas por los vehículos sumergibles autónomos se agrupan en:

- Triangulación de la posición del vehículo con respecto a un grupo de transmisores acústicos localizados en posiciones conocidas, los mismos pueden estar instalados en el casco del buque nodriza (métodos: *Ultra Short Base Line (USBL)* y *Short Base Line (SBL)*) o en boyas ubicadas en la superficie del océano o ancladas al lecho marino (método: *Long Base Line (LBL)*) (LaPointe, 2006).
- Estimación de la posición a partir de conocer una posición inicial y un grupo de variables que relacionan al vehículo con su desplazamiento (*Dead Reckoning*), comúnmente mediciones iniciales (método: *Inertial Navigation System (INS)*) (Stutters et al., 2008).

Los algoritmos basados en triangulación tienen como desventaja la necesidad del despliegue de los transmisores previo al desarrollo de las misiones además de que las condiciones de temperatura y salinidad, entre otras, en el área de interés afectan el tiempo de propagación del sonido en el agua provocando errores en la estimación de la posición.

Los distintos métodos de *Dead Reckoning* tienen como principal lastre el hecho de que acumulan errores al paso del tiempo llegando a un estado descartable si no son actualizados por

otras fuentes de posición absoluta como podrían ser: el método de triangulación o las mediciones provenientes de un Sistema Global de Navegación por Satélite (*GNSS*) como *GPS* o *GLONASS*. Es válido destacar que esta última opción solo está disponible cuando el vehículo navega en superficie, ya que una vez sumergido, el agua atenúa la propagación de las ondas radioeléctricas volviéndolos inaccesibles.

Dado que el prototipo de *AUV* se supone que operará en ambientes no estructurados, donde no se cuenta con ningún tipo de transmisor acústico, se hace necesario centrarse en métodos de navegación auto-contenidos que logren un desempeño adecuado por determinados intervalos de tiempo antes de tomar referencias de posición absolutas.

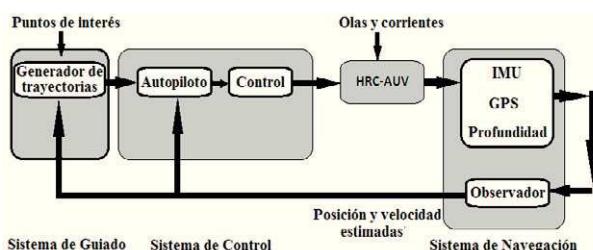


Figura 1: Estructura del sistema de navegación del *HRC-AUV*

La Figura 1 muestra la estructura general del sistema propuesto. En el que se emplea el modelo dinámico de navegación (*DNVM* por sus siglas en inglés) para la implementación de un observador de estados y como mediciones: las salidas del sistema *IMU/INS*, el sensor de profundidad y el *GPS*. El uso del *DNVM* como fuente de corrección es un tema poco abordado en la literatura pero que ya ha demostrado su validez teórica y práctica en los trabajos de otros investigadores (Hegrenaes et al., 2007a; Morgado et al., 2007; Hegrenaes and Hallingstad, 2011). La lógica de funcionamiento concebida plantea una operación mayormente sumergida con cortos intervalos de tiempo en superficie para corregir los errores acumulados durante la inmersión.

2.3. Modos de trabajo del AUV

El vehículo presenta un grupo de modos de trabajo acorde a las necesidades para su desarrollo y el cumplimiento de las futuras aplicaciones. Estos modos de operación son:

- Tele-operación: Modo de trabajo manual sin soporte de los algoritmos de control, disponible en superficie y usado normalmente para las funciones de salida y atraque en puerto. Este modo se emplea de igual forma para desarrollar los experimentos de identificación del modelo dinámico de la planta.
- Autopiloto: Modo básico autónomo, permite seguir una trayectoria con rumbo y profundidad definidos. Los algoritmos de control implementados garantizan la operación hasta condiciones de mar fuerza 3.

- Seguimiento de trayectoria: Este modo de trabajo en lazo cerrado permite a los usuarios del vehículo marcar sobre una carta náutica o mapa un grupo de puntos de interés por los que se desea que el *AUV* discurre.

2.4. Estrategias de control

Para el primer prototipo de *HRC-AUV* y debido a su alta fiabilidad y facilidades de ajuste se decidió emplear en los lazos de control de rumbo y profundidad algoritmos tipo *PID*. Este algoritmo de control, ha demostrado su validez en este tipo de aplicaciones (Kangsoo and Tamaki, 2002; Jakuba, 2003; McEwen and Streitlien, 2006; Petrich, 2009) y pese a su gran tiempo en el arsenal de los investigadores se mantiene como uno de los más usados en aplicaciones industriales (García et al., 2012).

3. Arquitectura de Hardware

El diseño de la arquitectura de hardware y la selección de los sensores a bordo del *HRC-AUV*, fue realizado por *GARP*. En la Figura 2 se muestran esquemáticamente los distintos elementos de hardware que componen el sistema. Vale señalar que la versión aquí presentada es una actualización de la presentada en (Martinez et al., 2010), con el propósito de reducir el volumen del equipamiento y ganar en: fiabilidad, cobertura de comunicaciones y potencia de cálculo para realizar las tareas de navegación. De igual forma es válido aclarar que los elementos enmarcados en línea discontinua (sonar, brújula adicional y MODEM acústico) no estaban operativos al momento de las pruebas de mar reportadas en este documento. Esta estructura tiene dos segmentos claramente definidos: el de a bordo en el submarino y el remoto, ubicado en tierra firme o a bordo del buque nodriz.

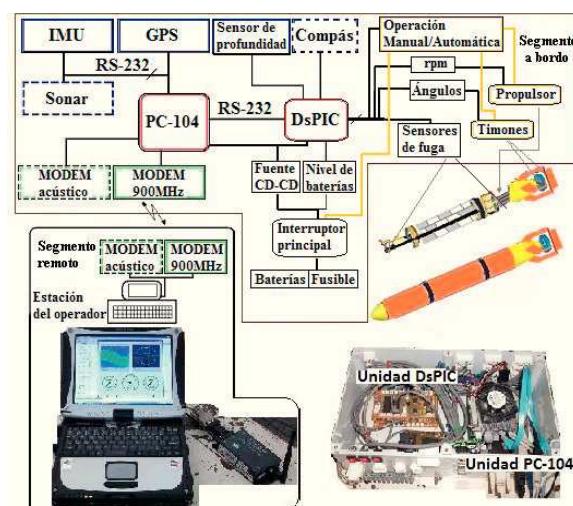


Figura 2: Arquitectura de hardware del *HRC – AUV*

El segmento a bordo está compuesto por dos unidades de cómputo y una de potencia. Las unidades de cómputo son: una

computadora industrial *PC-104* modelo “PCM-3362” de la firma Advantech® y un sistema empotrado diseñado por *GARP* basado en dos *DsPIC 33FJ64* de la firma Microchip®. Estas dos unidades se dividen el trabajo de adquisición de datos desde los sensores y las tareas de navegación y control, resultando en la siguiente asignación de trabajos (Martinez et al., 2010):

Unidad *DsPIC*: Maneja todas las mediciones analógicas relacionadas con: profundidad, ángulo de timones, parámetros de propulsión, nivel de baterías y sensores de fugas. En esta unidad se ejecutan los algoritmos de control de rumbo y profundidad del *AUV*.

Unidad *PC-104*: Esta unidad desarrolla el algoritmo de navegación acorde a la Figura 1. Es la encargada de estimar la posición y actitud del vehículo partir de la relación *INS/DNVM/GPS*, maneja los históricos y administra las comunicaciones con la estación remota.

Unidad de potencia: Está compuesta por un bloque *CD-CD* que brinda todos los voltajes requeridos por la arquitectura de hardware del *AUV*.

Esta arquitectura dual, con separación de funciones para el sistema de cómputo a bordo, ha sido una solución implementada por otros investigadores en la misma situación (Calvo et al., 2009; Sangekar et al., 2008)

El segmento remoto está compuesto por un ordenador portátil donde se ejecuta el sistema de supervisión y configuración del *AUV* (requerimientos mínimos: procesador Pentium IV y 256 MB de RAM). El ordenador utiliza un dispositivo de comunicaciones inalámbricas y antenas apropiadas para el intercambio de datos durante las misiones (siempre que el vehículo esté navegando en superficie o a altura de periscopio).

3.1. Unidad *DsPIC*

Diseñada por *GARP* y compuesta por dos bloques (Digital y Analógico), tiene como núcleo dos *DsPIC 33FJ64* de la firma Microchip® y es la encargada del control y la adquisición de las variables de estado del *AUV*. Su concepción dual le permite tener redundancia de las funciones de mayor significación para el vehículo, dígase: manejo de lazos de control y alarmas o el encendido y apagado del sistema.

Tabla 2: Capacidades de la unidad *DsPIC*

Descripción	Característica	Número
entrada analógica	500 ksp/s, 12 bit	4
entrada analógica filtrada	100 ksp/s, 12 bit	8
entrada de encoder		4
entrada/salida digital		11
salida analógica	± 10 v	8
salida PWM		2
Interfaz RS-232		5
Interfaz SPI		2
Interfaz I2C		1

Su diseño ponderó disponer de una amplia gama de interfaces de forma tal que le permitieran acomodar una variada gama

de sensores en función de las futuras aplicaciones y la evolución del proyecto. De la misma forma las interfaces de comunicación implementan varios protocolos, facilitando que otros sistemas digitales profesionales puedan ser integrados al diseño. Un resumen de las capacidades instaladas se puede apreciar en la Tabla 2.

Es válido señalar que la comunicación entre los bloques analógico y digital se realiza a través de una de las interfaces *SPI*.

3.2. Unidad *PC-104*

Esta unidad es necesaria, en primer lugar, por las demandas computacionales del algoritmo de navegación asistida (Figura 1), además gestiona las comunicaciones y el manejo de históricos del sistema. Como se mencionó, está implementada a partir de una computadora industrial *PC-104*, modelo *PCM-3362* de la firma Advantech®. Su bajo consumo y poca dissipación de potencia la hacen adecuada para el ambiente hermético donde está instalada. Como sistema operativo emplea *GNU-Linux*, recompilado para activar el parche de baja latencia, de forma tal que le permita al sistema cumplir con los requerimientos de tiempo real de la aplicación.

3.3. Sensores

Varios autores han propuesto versiones de la arquitectura de hardware para un *AUV* (Hegrenae et al., 2007b; Sangekar et al., 2008; Brown et al., 2009; Calvo et al., 2009), típicamente optimizadas acorde al contexto de la aplicación que desarrollan y el presupuesto disponible. No obstante, se puede plantear que existe un acuerdo general en cuanto a que sensores deben acompañar a los medios de cómputo instalados en un *AUV* dígase: sistema de posicionamiento, sensores iniciales, de profundidad, de fugas y otros capaces de medir las condiciones generales de operación. La estructura del sistema debe ser capaz de: realizar control en tiempo real del vehículo, interactuar con el entorno y detectar diferentes fuentes de error.

La arquitectura de hardware del *HRC-AUV* permite desarrollar los tres modos de trabajo expuestos en la sección 2. Todo esto con el reto extra de usar sensores de bajo costo, por lo tanto, con mayores incertidumbres.

De acuerdo a la clasificación propuesta en (Batlle et al., 2004) los sensores instalados a bordo del *HRC-AUV* (Figura 2) pueden ser agrupados en las siguientes categorías:

Sensores del sistema

- Unidad de Medida Inercial (*IMU*): MTi de la firma Xsens®. Sensor digital. Esta unidad brinda referencia de actitud y rumbo del vehículo.
- Sensor de presión: Cerabar T PMP 131 de la firma Endress + Hauser®, sensor analógico. Usado para determinar la profundidad de operación del *AUV*.
- Sensor de nivel de baterías: sensor analógico. Diseñado por *GARP* hace una estimación del estado de las baterías, basado en los niveles de voltaje y corriente entregados al sistema.

- Sensores de fuga: sensor digital. Detecta vías de agua. Se encuentran localizados en el fondo del casco a proa y popa.
- Ángulo de los timones: MLO-POT-225-TLF de la firma Festo®, sensor analógico. Mide la posición angular de los timones de rumbo y profundidad (entradas al *DNVM*).
- Revoluciones del motor propulsor: sensor digital. Diseñado por GARP, mide las revoluciones (*rpm*) de dicho motor, (entrada al *DNVM*).

Sensores de navegación

- *IMU*, este sensor es empleado para generar la Solución de Navegación Inercial.
- *GPS*: XL12 de la firma Garmin®. Brinda información sobre la posición del vehículo dada en latitud, longitud y altura (se emplea solamente en la navegación en superficie).
- Sensor de presión, brinda la posición en el eje z (abajo) interactuando con la solución de navegación inercial a través del filtro de Kalman empleado para fusión de información.

Sensores de misión

El proyecto *HRC-AUV* todavía es un prototipo, pero dadas las misiones de exploración y supervisión supuestas para el vehículo, los sensores más comunes a emplear serían una cámara y un sonar de barrido lateral. No obstante el diseño del sistema dada su flexibilidad es capaz de integrar otros sensores tanto analógicos como digitales.

3.4. Integración del sistema

Como se muestra en la Figura 3, la unidad *DsPIC* toma datos desde los sensores y los procesa para actualizar la base de datos de estado. Previo a esto una serie de filtros analógicos y digitales son aplicados a las mediciones. El primer filtro es una simple red *RC* con frecuencia de corte 1 rad/s para eliminar el efecto de *aliasing*. Despues de esto, cada variable tiene su propio tratamiento digital. Las mediciones de rumbo y profundidad, por ejemplo, se ven afectadas por las olas (Fossen, 2002; Willumsen et al., 2007). Para corregir estos efectos, el vehículo implementa dos estrategias indistintamente: un filtro de Butterworth o un observador pasivo (García-García et al., 2012). Todas las mediciones operan a 10 Hz. Esta frecuencia de igual forma es usada en el lazo interno de control de los timones y el lazo externo de profundidad y rumbo. El canal de comunicación con la *PC-104* para la adquisición de los datos desde la *IMU* y el *GPS* opera a 10 Hz, este canal también es usado para la obtención de los valores deseados de los reguladores y para realizar una salva de los históricos de operación del sistema.

La unidad *PC-104* (Figura 4) ejecuta de la solución de navegación y de la adquisición de los datos desde la *IMU* y el *GPS*. La *IMU* proporciona la actitud y razones de giro del vehículo, variables esenciales para los lazos de control. Este sensor opera a una frecuencia configurable entre 25 y 100 Hz, los datos

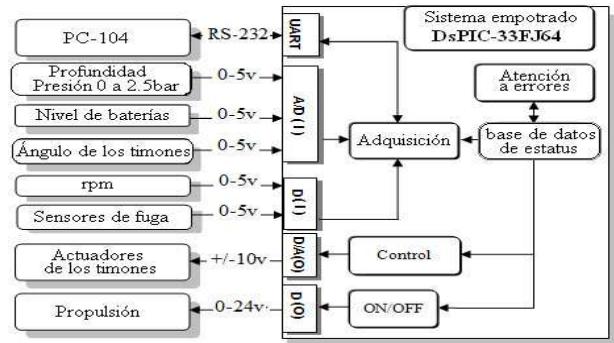


Figura 3: Unidad *DsPIC*

que provee son usados para implementar la solución de navegación inercial. La misma puede ser asistida en dependencia de las circunstancias de operación por: el modelo dinámico de navegación (*DNVM*), el sensor de presión y el *GPS*. La fusión de las mediciones es alcanzada a través de un filtro extendido de Kalman (*EKF*).

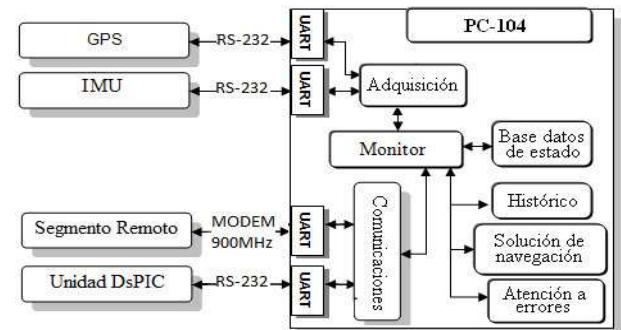


Figura 4: Unidad *PC-104*

La unidad *PC-104* es responsable de la manipulación de la base de datos del sistema y la generación de históricos. De la misma forma provee información: del estado, posición, actitud y velocidad del vehículo a la estación del operador, a través de un enlace inalámbrico vía MODEM; recibiendo de la estación del operador los ajustes de los controladores y los comandos de tele-operación.

3.4.1. Configuración del sistema

Durante las pruebas de mar que finalizaron con la misión de seguimiento de trayectoria, la arquitectura de hardware del *HRC-AUV* estuvo configurada acorde a lo expresado en la Tabla 3. Acumulando en dichas pruebas más de 60 horas de explotación en varias jornadas de experimentos demostrando robustez y excelente fiabilidad.

4. Arquitectura de software

Como se puede apreciar en la Figura 2 el sistema está dividido en dos grandes segmentos el que se encuentra a bordo y el

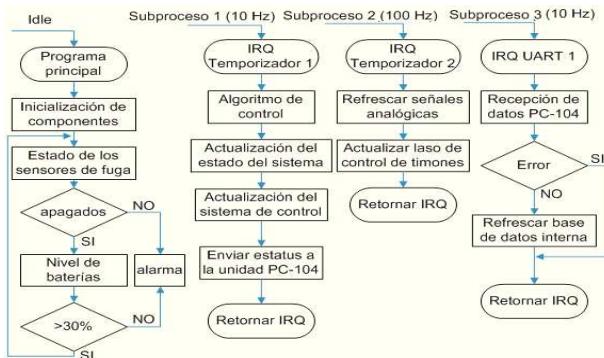
Tabla 3: Parametrización del HRC-AUV

Sensor	Muestreo	Variable de salida
IMU	100 Hz	actitud en ángulos de Euler, aceleración y razón de giro
GPS	1 Hz	posición, velocidad y tiempo
Profundidad	10 Hz	profundidad en metros,
Timones	10 Hz	± 30°
Restantes	10 Hz	

remoto. El primer segmento está constituido por el vehículo y toda la electrónica a bordo y el segundo por la estación remota. Ambos segmentos tienen tareas muy claras en el marco de la aplicación. El segmento a bordo es destinado al control del vehículo, la ejecución del algoritmo de navegación y el manejo de errores y alarmas. La estación remota constituye el eslabón más alto en el marco de la planificación de tareas, ajuste de reguladores y la supervisión.

Ambos segmentos tienen software incluido y en el caso del sistema a bordo está dividido entre las unidades *DsPIC* y *PC-104*. Esta estructura crea la necesidad de algoritmos de sincronización dado que la mayoría de las variables viajan a través de las distintas unidades y segmentos. El software presente en la unidad *PC-104* fue desarrollado utilizando el lenguaje de programación *C*, esto permite hacer uso óptimo de las potencialidades de *GNU/Linux* y una adecuada gestión de las tareas de tiempo real. La plataforma de desarrollo seleccionada para la implementación del software en la estación de operación fue “.Net Framework”. El diseño de este sistema está basado en *Unified Modeling Language (UML)*, para especificar y documentar todos los elementos de funcionalidad del sistema así como sus interfaces.

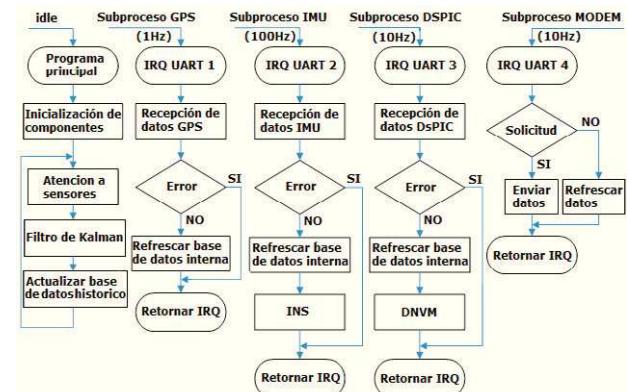
4.1. Software en la unidad DsPIC

Figura 5: Temporización de tareas en la unidad *DsPIC*

Esta unidad maneja el algoritmo de control del sistema y provee los mandos a los actuadores que regulan los timones del vehículo. El diseño se basa en habilitar o deshabilitar diferentes elementos del lazo de control y la parametrización de los elementos habilitados. Este software es un *firmware* simple ejecu-

tando un algoritmo cíclico con la capacidad de reaccionar ante algunas fuentes de error (Figura 5).

4.2. Software en la unidad PC-104

Figura 6: Hilos del software de la unidad *PC-104*

La operación general de esta unidad es mostrada en la Figura 6. Este esquema de operación refleja algunas tareas que se describen a continuación:

- Adquirir la información brindada por la: *IMU* y el *GPS*.
- Llevar a cabo la navegación inercial asistida. Determinar: posición actual (lineal y angular), rumbo y velocidad del vehículo.
- Adquirir la información desde la unidad *DsPIC* relacionada con los sensores conectados a esta unidad e inspeccionar el estado del control.
- Actualizar la base de datos interna del sistema.
- Adquirir los valores de ganancia de los controladores desde la estación remota.
- Enviar la información de actitud del vehículo, valores deseados y ajustes de los controladores a la unidad *DsPIC* (encargada del control).
- Ejecutar el software de comunicación.
- Reportar el estado y la posición del medio a la estación remota que se encarga de la supervisión.

Las tareas son ejecutadas con diferentes niveles de prioridad para garantizar una atención preferente a los sensores que requieran un mayor tiempo de muestreo.

4.2.1. Software de comunicación

El software de comunicación se apoya en el protocolo *RS-232* para el intercambio de información entre las unidades de cómputo en el segmento a bordo y la unidad remota acorde a un sistema de tramas con la siguiente estructura:

Preámbulo	IDdev	Tamaño	IDdat	Datos	Fin
-----------	-------	--------	-------	-------	-----

En general las tramas de datos se clasifican en: tramas de solicitud de datos y tramas de configuración. Las primeras son enviadas desde la estación remota a la estación a bordo con vistas a solicitar el paquete de datos a supervisar. Por su parte las segundas contienen los datos de configuración que se transmiten entre la estación remota y la PC-104. Las configuraciones están dadas por la actualización de controladores, el envío de comandos de tele-operación así como los datos de misión. Las tramas de configuración poseen confirmación de recepción, lo cual permite que una vez enviado un dato entre estaciones el mismo se continúe enviando hasta recibir una confirmación de arriba correcto. Esto es significativo para la fiabilidad del sistema dado que el ruido y la mala propagación de las señales radioeléctricas cerca de la superficie marina podrían causar efectos indeseables.

4.3. Software en la estación remota

El software ejecutado en la estación remota es utilizado como herramienta de supervisión y configuración a distancia del HRC-AUV. Esta aplicación incorpora interfaces gráficas diseñadas apropiadamente para facilitar la interacción remota con el vehículo. En la Figura 7 se muestra el diagrama de casos de uso general de dicha aplicación.



Figura 7: Diagrama de casos de uso general

4.3.1. Servicio de supervisión

Gracias a este servicio durante la ejecución de una misión, la estación remota recibirá y mostrará la información sensorial relevante. Esta información está relacionada con la posición espacial del vehículo dada en latitud/longitud, los ángulos de cabeceo y balanceo que experimenta así como su rumbo, profundidad, velocidad y su estado (presencia de agua dentro del casco y motor propulsor encendido o apagado). Para la supervisión se implementa una interfaz de usuario independiente que permite monitorear el vehículo mientras se realizan otras tareas de configuración. Es válido destacar que este servicio recibe información cuando el vehículo navega en superficie o a altura de periscopio.

La Figura 8 presenta la interfaz de supervisión. A continuación se describen los elementos de esta interfaz:



Figura 8: Interfaz de supervisión

- Mapa: mapa geográfico sobre el cual se refleja la trayectoria del vehículo.
- Horizonte: indica los ángulos de cabeceo y balanceo del vehículo.
- Brújula: indica el rumbo con respecto al norte magnético.
- Profundidad: muestra la profundidad (en metros) a la que se navega.
- Velocidad: muestra la velocidad de navegación del vehículo.
- En la parte inferior de la pantalla se muestra información de los sensores de presencia de agua, temperatura, energía y estado del motor propulsor.

4.3.2. Servicio de tele-operación

Mediante este servicio el usuario puede manejar remotamente el vehículo. La tele-operación se realiza cambiando remotamente el ángulo del timón de rumbo. Esta operación se puede realizar mediante el teclado de la computadora portátil o mediante un JoyStick conectado a la misma. Además, permite encender y apagar el motor propulsor.

4.3.3. Servicio de ajuste de controladores

El servicio de ajuste de controladores permite cambiar los valores de las ganancias de los controladores. Para ello, la interfaz se divide en dos grupos, uno dedicado a las ganancias del control de rumbo y la otra al control de profundidad. El sistema incorpora gráficas en la interfaz de usuario que sirven para evaluar el desempeño del vehículo ante un ajuste determinado, además ofrece opciones para activar o desactivar los distintos lazos de control y permite configurar los valores deseados de rumbo y profundidad.

4.3.4. Servicio de identificación

La aplicación permite, a través de este servicio, manejar el vehículo para obtener datos experimentales del mismo. Los datos experimentales son empleados en la obtención de parámetros del modelo analítico que luego son utilizados en el ajuste

de los controladores. Una descripción de estos procedimientos puede ser encontrada en otro trabajo de los miembros de GARP (Valeriano-Medina et al., 2012).

4.3.5. Servicio de planificación de trayectorias

La aplicación remota cuenta con una interfaz que permite la planificación de trayectorias a través de mapas georeferenciados. El proceso de planificación se realiza situando puntos de paso sobre el mapa con el puntero. Estos puntos constituyen los lugares por los que se desea pase el vehículo, los mismos se pueden editar dinámicamente al igual que la tolerancia (en metros) bajo la cual se toma un punto como vencido. Adicionalmente, se pueden emitir las órdenes de inicio y parada de la misión de seguimiento.

4.3.6. Otras opciones y herramientas

Para minimizar riesgos de operación el sistema remoto incorpora funcionalidades que permiten tomar decisiones eficaces ante un mal funcionamiento del sistema, alarmas por presencia de agua o eventos inesperados. Como herramienta adicional incorpora un servicio de simulación que permite visualizar los resultados de un experimento luego de realizado.

5. Control de rumbo y profundidad

El primer paso para la síntesis de un algoritmo de control es disponer de un modelo de la planta a controlar. La teoría reconoce dos grandes vías para obtener los parámetros dinámicos de un vehículo sumergible: por un lado están los métodos basados en el análisis del comportamiento físico con el uso de softwares, que manejan la dinámica de fluidos (*CFD* por sus siglas en inglés), acompañados por un grupo de pruebas experimentales de alta complejidad (Kangsoo and Tamaki, 2002); mientras que por otro lado se encuentran los métodos basados en el análisis de la geometría del vehículo y la realización de una serie de pruebas experimentales de menor complejidad, mediante el cual se obtienen modelos aproximados que describen la dinámica del cuerpo en determinadas condiciones operacionales. Este último método es ampliamente descrito en las publicaciones del profesor Thor I. Fossen (Fossen, 1994, 2002; Fossen and Ross, 2006; Fossen, 2011) y se ha aplicado con éxito al modelado de varios vehículos sumergibles (Jakuba, 2003; Estrela da Silva et al., 2007); por estas razones ha sido seleccionado como método básico de modelado para el *HRC-AUV* (Valeriano-Medina et al., 2012).

Dinámicamente un *AUV* se puede considerar como un sólido rígido con seis grados de libertad (6 *GDL*): tres coordenadas para los movimientos de traslación y otras tres para los movimientos de rotación, donde el movimiento se describe con respecto a un sistema de referencia inercial. Normalmente se toma como referencia de sistema inercial a la Tierra dado que la aceleración debida a la rotación de la misma en un punto de su superficie puede ser despreciada para vehículos marinos que se desplazan a bajas velocidades. De esta forma puede considerarse que un sistema de referencia situado en tierra (*OE*) es un sistema inercial cuyos ejes de coordenadas *x* y *z* están dirigidos

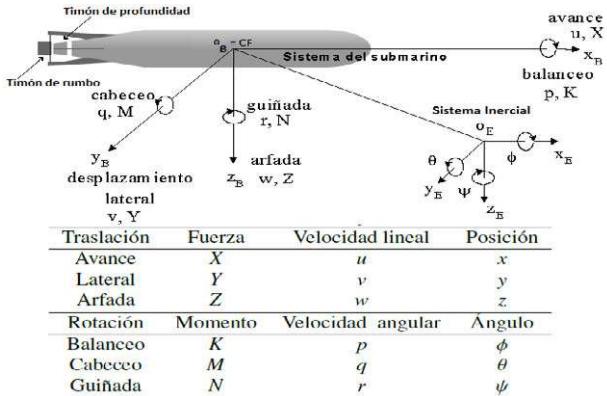


Figura 9: Sistemas coordinados y definición de desplazamientos

hacia el Norte, Este y hacia abajo respectivamente (*NED* por sus siglas en inglés).

En la Figura 9 se representan los sistemas de coordenadas y la definición de los movimientos de traslación y rotación del vehículo. De aquí se infiere que la posición y orientación del vehículo deben ser referidas a (*OE*) mientras que las velocidades lineales y angulares estarán asociadas a un sistema de coordenadas móvil situado en el vehículo (*OB*). El origen del sistema de coordenadas del submarino se puede elegir coincidiendo con el centro de flotabilidad (*CF*) como es el caso, o referido al centro de gravedad (*CG*), aprovechando que usualmente tanto el uno como el otro están situados en los planos de simetría del vehículo.

En la parte inferior de la Figura 9 se resume la nomenclatura utilizada para describir el movimiento, las fuerzas y los momentos asociados al móvil siguiendo la notación estándar recomendada para su utilización en las aplicaciones de maniobra y control de submarinos (SNAME, 1950). El vector velocidad con respecto al sistema de coordenadas del vehículo queda definido por:

$$\nu = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \text{ con } v_1 = [u, v, w]^T \text{ y } v_2 = [p, q, r]^T \quad (1)$$

Por su parte el vector de posición y orientación respecto al sistema de referencia inercial queda determinado por:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \text{ con } \eta_1 = [x, y, z]^T \text{ y } \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (2)$$

Los vectores de velocidad, posición y orientación referidos a los dos sistemas de referencia, ecuaciones (1) y (2), se relacionan a través de las transformaciones de ángulos de Euler (Fossen and Ross, 2006).

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (3)$$

5.1. Ecuaciones dinámicas de movimiento del vehículo

Las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo en el espacio tridimensional pueden obtenerse a partir de las le-

yes de conservación de los momentos lineales y angulares referidos a un sistema inercial de referencia. Fossen (Fossen, 1994) demuestra que la segunda ley de Newton puede expresarse para cualquier vehículo subacuático con un sistema de coordenadas fijo al cuerpo, como una sumatoria de los términos del cuerpo rígido, hidrodinámicos y hidrostáticos de la forma:

$$\underbrace{M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v}_{\text{términos de cuerpo rígido}}, \underbrace{+ M_A\dot{v} + C_A(v)v + D(v)v}_{\text{hidrodinámicos}} + \underbrace{g(\eta)}_{\text{e hidrostáticos}} = \tau \quad (4)$$

donde:

M_{RB} matriz de inercia

C_{RB}(v) matriz de fuerzas centrípeta y de Coriolis

M_A matriz de inercia de masas añadidas

C_A(v) matriz de fuerzas centrípeta y de Coriolis de masas añadidas

D(v) matriz de amortiguamiento

g(η) vector de momentos gravitacionales y de flotabilidad

τ vector de entradas de control, que para el caso del *HRC-AUV* queda definido como:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \\ \tau_K \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \\ 0 & b_4 & 0 \\ 0 & 0 & b_5 \\ 0 & b_6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \\ \delta_E \end{bmatrix} \quad (5)$$

5.2. Modelo dinámico linealizado

Para los AUVs tipo crucero de baja velocidad es común dividir las ecuaciones de movimiento de 6 *GDL* en dos subsistemas desacoplados de 3 *GDL*, o pobemente acoplados (la simetría del vehículo garantiza el desacoplamiento), utilizados para el control del vehículo en los planos *x* – *z* y *x* – *y* de *OE* respectivamente (Fossen and Ross, 2006).

- Subsistema longitudinal: estados (*u, w, q*) y (*x, z, θ*)
- Subsistema lateral: estados (*v, p, r*) y (*y, φ, ψ*)

En (Valeriano-Medina et al., 2012) los investigadores de *GARP* plantean el modelo dinámico acoplado del *HRC-AUV*, así como las simplificaciones y condiciones necesarias para arribar a las funciones de transferencia necesarias para plantear los lazos de control de rumbo, cabeceo y profundidad del vehículo. Las mismas son:

- Función de transferencia entre el ángulo del timón de profundidad δ_E y el cabeceo θ :

$$\frac{\theta(s)}{\delta_E(s)} = \frac{b_5}{(I_{yy} - M_{\dot{q}})s^2 - M_qs + WBG_z} \quad (6)$$

- Función de transferencia entre el ángulo de cabeceo θ y la profundidad *z*:

$$\frac{z(s)}{\theta(s)} = \frac{-u_0}{s} \quad (7)$$

■ Función de transferencia entre el ángulo del timón de rumbo δ_T y el rumbo ψ fue determinada experimentalmente como:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,14}{4s^2 + s} \quad (8)$$

De los experimentos descritos en (Martinez et al., 2010; Valeriano-Medina et al., 2012) fue posible obtener los términos necesarios para sustituir en la ecuación 6, dígase: el término ganancia de actuadores $b_5 = 96,32 \frac{Nm}{rad}$, el término de arrastre lineal $M_q = -9096,9 \frac{Nm}{rad/s}$ y el término de masas añadidas $M_{\dot{q}} = -15\,572 \text{ kgm}^2$. BG_z es el componente en “*z*” del vector **BG** (Tabla 1).

5.3. Control de profundidad

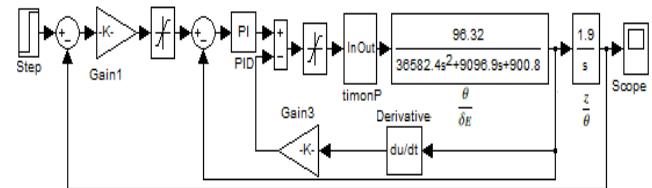


Figura 10: Estructura del lazo de control de profundidad

Partiendo de las ecuaciones (6) y (7), se plantea como sistema de control una estructura en cascada, similar a la utilizada por otros autores (Kangsoo and Tamaki, 2002), con un regulador *PI-D* para el lazo de cabeceo θ y un regulador *P* para el lazo externo de profundidad representado en el esquema de la Figura 10. La respuesta simulada y la obtenida experimentalmente ante una entrada paso de 2,25 m se puede apreciar en la Figura 11. Las ganancias del regulador del lazo interno: $P = 6$, $I = 0,01$ y $D = 0,5$ y del lazo externo: $P = 0,05$.

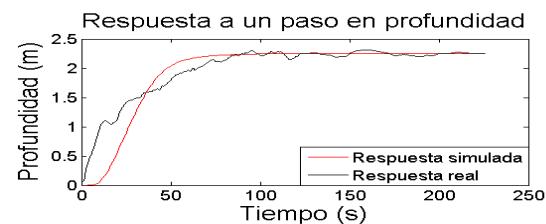


Figura 11: Respuesta del lazo de control de profundidad

5.4. Control de rumbo

El lazo de control de rumbo (ψ) tiene una estructura más sencilla. Partiendo de la ecuación (8) se plantea un regulador *PI-D* como se muestra en la Figura 12. Los parámetros de ajuste del regulador fueron $P = 1,5$, $I = 0,12$ y $D = 1$. La respuesta simulada y real ante una variación en el rumbo deseado de 50 ° se puede apreciar en la Figura 13.

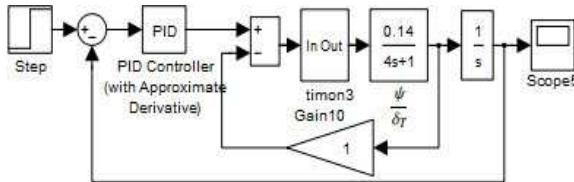


Figura 12: Estructura del lazo de control de rumbo

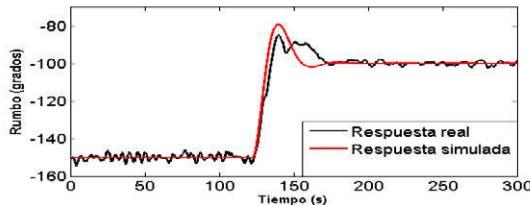


Figura 13: Respuesta del lazo de control de rumbo

6. Seguimiento de trayectoria

Una vez concretado el lazo de control de rumbo, el próximo paso lógico en el desarrollo del *AUV*, es el seguimiento de trayectorias. En (EncarnaÃ§Ã£o and Pascoal, 2001; Breivik and Fossen, 2004) se define la trayectoria deseada como la curva que une un conjunto de puntos de interés definidos por el usuario. Esta curva, se define entonces mediante métodos de interpolación. La implementación reportada en este documento es una primera aproximación a esta problemática y centra su atención en los puntos obviando la fidelidad del trayecto intermedio. De esta forma el vehículo navegará con rumbo estimado al punto más cercano y una vez en la proximidad de este cambiará su rumbo en dirección al siguiente punto de consigna.

Para implementar este algoritmo se define la posición actual del vehículo como \mathbf{P}_0 y la posición del punto de consigna de interés como \mathbf{P}_1 , ambas referidas al plano de navegación. El valor de rumbo deseado (ψ_D) queda definido por la ecuación (9).

$$\psi_D = \tan^{-1} \left(\frac{P_{1y} - P_{0y}}{P_{1x} - P_{0x}} \right) \quad (9)$$

La condición de punto alcanzado se define para:

$$D_{(\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1)} < R$$

Siendo $D_{(\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1)} < R$, la norma euclídea del error de posición y R , la distancia de seguridad, que define una región circular de aceptación alrededor del punto de interés. Este valor umbral, es configurable por el operador en la estación remota entre 2,5 m y 100 m.

En la Figura 14 se muestra el resultado de la implementación del algoritmo antes descrito. En la gráfica, los puntos de consigna están representados por las círculos rojos, mientras que en verde se representa la trayectoria real seguida por el vehículo. Este experimento desarrollado en Julio de 2010 y

con un recorrido total de 3,6 km, tenía por objetivo validar las potencialidades del *HRC-AUV* ante una serie de maniobras y ajustar el lazo de control de rumbo en presencia de las corrientes marinas.

El equipo *GARP* trabaja en estos momentos, en algoritmos basados en polinomios de interpolación como los descritos en la bibliografía consultada que deben mejorar el desempeño del vehículo y minimizar el efecto de las corrientes en el control de trayectoria.

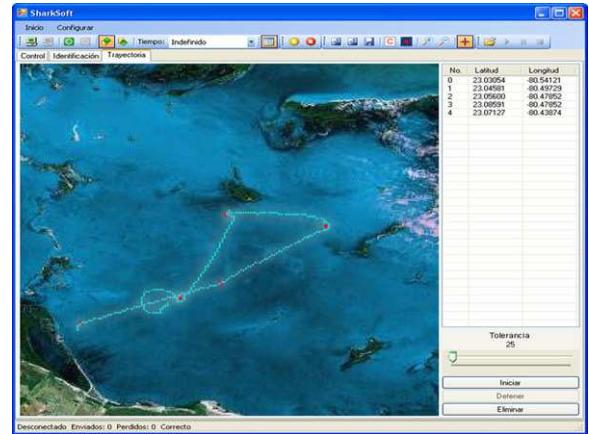


Figura 14: Prueba experimental de seguimiento de trayectoria

7. Conclusión

En el presente documento se resumen los resultados obtenidos por *GARP* y el Centro de Investigaciones Hidrográficas en la concepción, diseño y puesta a punto de la arquitectura de hardware y software del *HRC-AUV*. Dicha arquitectura ha mostrado en las pruebas de mar realizadas su fiabilidad y adecuado desempeño, al permitir a los investigadores realizar todas las funciones para las que fue concebida. Gracias a sus prestaciones fue posible obtener toda la información requerida para parametrizar y posteriormente validar el modelo dinámico de la planta que fue usado en una versión simplificada para sintetizar los lazos de control de rumbo y profundidad aquí expuestos.

El sistema concebido está basado en hardware de fácil adquisición para permitir su réplica por otros investigadores. De igual forma el software está concebido con una estructura modular basada en capas. Esta estructura facilita la migración del código fuente entre diferentes plataformas de desarrollo, así como la extensión de las funcionalidades de la aplicación a través de la inclusión de nuevos módulos a la misma.

En paralelo con el presente documento los investigadores preparan otro documento íntegramente dedicado a la obtención del modelo dinámico lineal en espacio estado (*DNVM*) del *HRC-AUV*. Dicho modelo es empleado por los algoritmos de navegación asistida y será utilizado en versiones futuras para sintetizar otras variantes de control.

English Summary

AUV design. Hardware and Software Architecture

Abstract

This paper discusses the strategy under which were conceived the hardware and software architecture for autonomous vehicle prototype: *HRC-AUV*, and the selection of the fundamental elements that compose them. The obtained design weights simplicity and development in terms of low cost, factors useful to researchers begin their activity in this field. The paper summarizes the benefits provided by these structures and preliminary operational tests that have been submitted to demonstrate the validity of their use in the operation of an AUV. Likewise are linearized dynamic models of the plant, used in the tuning of the control loops are presented. The response of such loops and in general the *HRC-AUV* navigating in the ocean is presented through the results of several experimental tests.

Keywords:

AUV, hardware architecture, software architecture.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al resto de los miembros de *GARP* y del Centro de Investigaciones Hidrográficas, por su colaboración en el desarrollo de las pruebas de mar. Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Consejo de Universidades Flamencas, “Programa Institucional de Cooperación Universitaria” (*Flemish Interuniversity Council, “Institutional University Cooperation program”*).

Referencias

- Batlle, J., Ridao, P., Garcia, R., Carreras, M., Cufí, X., El-Fakdi, A., Ribas, D., Nicosevici, T., Batlle, E., Oliver, G., Ortiz, A., Antich, J., 2004. Uris: Underwater robotic intelligent system. In: Aranda, J., Armada, M. A., de la Cruz, J. M. (Eds.), Automation for the Maritime Industries. Instituto de Automática Industrial, pp. 177–203.
- Breivik, M., Fossen, T., 2004. Path following of straight lines and circles for marine surface vessels. In: IFAC Conf. Contr. Appl. Marine Systems. Ancona, Italy.
- Breivik, M., Fossen, T., 2009. Guidance laws for autonomous underwater vehicles. In: Inzartsev, A. V. (Ed.), Underwater Vehicles. InTech, Vienna, Austria, pp. 51–76.
- Brown, H. C., Kim, A., Eustice, R. M., 2009. An overview of autonomous underwater vehicle research and testbed at perl. Marine Technology Society Journal 43 (2), 33–47.
- Calvo, O., Sousa, A., Bibiloni, J., Curti, H., Acosta, G., Rozenfeld, A., 2009. Low-cost autonomous underwater vehicle for underwater acoustic inspections. Journal of Maritime Research 6 (2), 37–52.
- Encarnação, P., Pascoal, A., 2001. Combined trajectory tracking and path following: An application to the coordinated control of autonomous marine craft. In: Decision and Control. Vol. 1. IEEE, Glasgow, Scotland, UK, pp. 964–969 vol. 1.
- Estrela da Silva, J., Terra, B., Martins, R., Borges de Sousa, J., 2007. Modeling and simulation of the lauv autonomous underwater vehicle. In: 13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. IEEE Control Systems Society, Szczecin, Polonia.
- Fossen, T. I., 1994. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & Sons, N.Y, USA.
- Fossen, T. I., 2002. Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles. Marine Cybernetics Trondheim, Norway.
- Fossen, T. I., 2011. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons.
- Fossen, T. I., Ross, A., 2006. Nonlinear modelling, identification and control of uuv's. In: Sutton, R. . (Ed.), Advances in unmanned marine vehicles. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD, London, Great Britain, pp. 13–42.
- García, J. M., Almansa, J. A., Sierra, J. M. G., 2012. Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 9 (3), 205–218.
- García-García, D., Valeriano-Medina, Y., Hernandez, L., Martinez, A., 2012. Wave filtering for heading control of an auv based on passive observer. IJMS 41, 540–549.
- Hegrenæs, O., Hallingstad, O., 2011. Model-aided ins with sea current estimation for robust underwater navigation. IEEE, OCEANIC ENGINEERING 36 (2), 316 – 337.
- Hegrenæs, O., Hallingstad, O., Gade, K., 2007a. Towards model-aided navigation of underwater vehicles. Modeling, Identification and Control 28 (4), 10.
- Hegrenæs, O., Hallingstad, O., Jalving, B., 2007b. A comparison of mathematical models for the hugin 4500 auv based on experimental data. In: IEEE International Symposium on Underwater Technology (UT'07). IEEE Xplore, Tokyo, Japan, pp. 558–567.
- Jakuba, M. V., 2003. Modeling and control of an autonomous underwater vehicle with combined foil/thruster. Ph.D. thesis, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Kangsoo, K., Tamaki, U., 2002. 3-dimensional trajectory tracking control of an auv “r-one robot” considering current interaction. In: Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan.
- LaPointe, C. E., 2006. Virtual long baseline (vbl) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder. Master of science, Massachusetts Institute of Technology.
- Martinez, A., Rodriguez, Y., Hernandez, L., Guerra, C., Sahli, H., 2010. Hardware and software architecture for auv based on low-cost sensors. In: 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV. IEEE Xplore, Singapore, pp. 1428 – 1433.
- McEwen, R., Streitlien, K., 2006. Modeling and control of a variable-length auv. Technical report, Monterey Bay Aquarium Research Institute.
- Morgado, M., Oliveira, P., Silvestre, C., Vasconcelos, J., 2007. Vehicle dynamics aiding technique for usbl/ins underwater navigation system. In: Longi, S., Vukic, Z. (Eds.), 7th Conference of Control Applications in Marine Systems. Vol. 7. IFAC, Bol, Croatia.
- Petrich, J., 2009. Improved guidance, navigation, and control for autonomous underwater vehicles: Theory and experiment. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Sangekar, M., Chitre, M., Beng Koay, T., 2008. Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle starfish. In: OCEANS 2008. IEEE Xplore, Quebec, Canada, pp. 1–8.
- Sanz, P. J., Prats, M., Ridao, P., Ribas, D., Oliver, G., Ortiz, A., 2010. Recent progress in the rauvi project. a reconfigurable autonomous underwater vehicle for intervention. In: 52th International Symposium ELMAR-2010. IEEE, Zadar, Croatia, pp. 471–474.
- SNAME, 1950. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid., 1–5.
- Stutters, L., Liu, H., Tiltman, C., Brown, D. J., 2008. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS - PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS 38 (4), 581–589.
- Valeriano-Medina, Y., Martinez, A., Hernandez, L., Sahli, H., Rodriguez, Y., Cañizares, J., 2012. Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 1–26.
- Willumsen, A. B., Hagen, O. K., Boge, P. N., 2007. Filtering depth measurements in underwater vehicles for improved seabed imaging. In: OCEANS 2007. IEEE, Aberdeen, Scotland, pp. 1–6.