

Una arquitectura para el diseño conceptual de vehículos para exploración subacuática

Julio C. Correa ¹, Rafael E. Vásquez ², Juan A. Ramírez-Macías ³, Elkin A. Taborda ⁴,
Carlos A. Zuluaga ⁵, Norha L. Posada ⁶ y Jorge M. Londoño ⁷

Recepción: 24-01-2014 | Aceptación: 11-06-2014 | En línea: 30-01-2015

PACS: 89.20.Bb

doi:10.17230/ingciencia.11.21.4

Resumen

Este artículo presenta una arquitectura para el diseño conceptual de vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV). La arquitectura propuesta está basada en una revisión extensa de literatura y la experiencia obtenida durante 20 años con el desarrollo de tres sistemas ROV diseñados para misiones de inspección subacuática. El ROV se divide en cinco subsistemas: vehículo, estación en superficie, interfaz superficie/vehículo, sistema de control y software. Para cada uno de estos subsistemas se definen funciones y tareas, se enuncian componentes, se establecen interrelaciones con otros subsistemas y se plantean alternativas comúnmente utilizadas. La delimitación de los subsistemas desde el diseño conceptual busca evitar problemas en las fases avanzadas del desarrollo del sistema robótico de exploración.

Palabras clave: diseño de ROV; exploración subacuática; sistema robótico de exploración; vehículos submarinos autónomos

¹ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, julio.correa@upb.edu.co.

² Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, rafael.vasquez@upb.edu.co.

³ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, juan.ramirez@upb.edu.co.

⁴ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, elkin.taborda@upb.edu.co.

⁵ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, carlos.zuluaga@upb.edu.co.

⁶ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, norha.posada@upb.edu.co.

⁷ Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, jorge.londono@upb.edu.co.

An Architecture for the Conceptual Design of Underwater Exploration Vehicles

Abstract

This paper addresses an architecture for the conceptual design of remotely operated vehicles (ROV). The proposed architecture is based in an extensive literature review and the experience acquired during 20 years with the development of three ROV systems that were designed for underwater inspection. The ROV is divided into five subsystems: vehicle, surface station, surface/vehicle interface, control system, and software. For each subsystem, functions and tasks are defined, components are listed, interrelations with other subsystems are established, and commonly used alternatives are proposed. The subsystem's division used for the conceptual design process allows one to avoid problems in the advanced stages of the robotic exploration system development.

Key words: ROV design; underwater exploration; robotic exploration system; autonomous underwater vehicles

1 Introducción

Los vehículos subacuáticos operados remotamente (ROV, por sus siglas en inglés) son utilizados para la realización de diversas operaciones subacuáticas [1]. Estos vehículos están presentes en diferentes industrias, con aplicaciones que incluyen la inspección de estructuras sumergidas, salvamento marino, arqueología, investigación oceánica, entre otras. La norma NORSOK U-102 [2] divide estos vehículos en tres categorías: Clase I, observación pura; Clase II, observación con opción de carga útil; y Clase III, vehículos de trabajo.

El desarrollo de vehículos tipo ROV se ha dado desde hace muchos años a nivel mundial. Los desarrollos reportados en la literatura durante los últimos 30 años van desde vehículos diesel [3], pasando por el desarrollo de vehículos para aplicaciones a grandes profundidades [4],[5], vehículos para acuicultura [6], vehículos con propulsión híbrida (remolcados y autopropulsados) [7], vehículos diseñados para reducir el arrastre [8], cambios en las tendencias para el desarrollo de vehículos [9], vehículos para condiciones extremas [10], vehículos que operan en forma dual (autónomos y operados remotamente) [11], entre muchos otros. Esto muestra una clara tendencia

que soporta el interés que existe actualmente en el desarrollo de tecnología para exploración subacuática [12].

Los principales fabricantes de estos vehículos se encuentran en Estados Unidos y Reino Unido, con alrededor del 70 % de la producción mundial [13]. En Latinoamérica se han desarrollado diversos trabajos relacionados con ROV, especialmente en universidades de México [14],[15], Brasil [16],[17],[18] y Colombia [19],[20],[21],[22],[23]. El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana, con sede en Medellín, Colombia, ha desarrollado tres vehículos tipo ROV de Clase I, Figura 1. Esto representa una experiencia acumulada importante en el desarrollo de este tipo de sistemas robóticos.

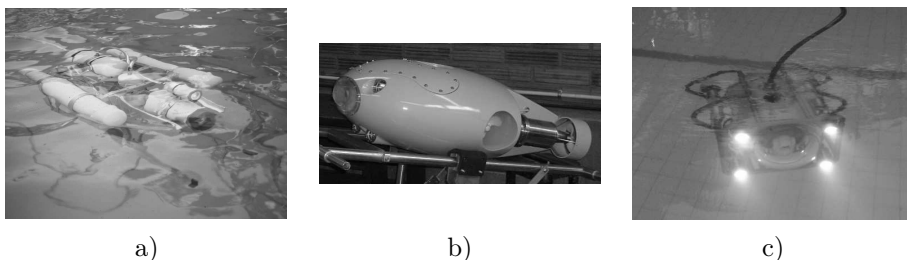


Figura 1: Sistemas ROV desarrollados en la UPB: a) VISOR (1995), b) VISOR II (2000) y c) Visor3 (2009)

En la literatura se describen con claridad los vehículos, pero hasta donde los autores conocen, en ningún trabajo se presenta una arquitectura para la división de subsistemas que permita abordar el diseño conceptual de manera ordenada. En este artículo se presenta una propuesta de arquitectura para el diseño conceptual de un sistema ROV. El trabajo está basado tanto en la revisión de la literatura existente sobre el tema, como en la experiencia del grupo de trabajo obtenida con el desarrollo de tres ROV en los últimos 20 años, ver [19],[20],[21]. El sistema ROV se divide en cinco subsistemas principales. Para cada uno de estos se hace una descripción de su función, sus componentes más comunes, algunas alternativas de solución, y cómo se da la interacción con otros subsistemas. La primera sección del artículo muestra una lista de requerimientos de diseño y se presenta la división del ROV en los cinco diferentes subsistemas. La segunda sección se dedica a las consideraciones de diseño del vehículo. La tercera sección se

dedica a la estación de superficie. La cuarta sección se dedica a la interfaz superficie/vehículo. La quinta sección se dedica al sistema de control. La sexta sección se dedica al software. Por último se exponen las conclusiones del trabajo.

2 Sistema ROV

Los requerimientos especificados para el diseño de un sistema de exploración subacuática normalmente incluyen: la clase de vehículo, el ambiente de operación, la profundidad de operación, los grados de libertad requeridos, la velocidad de desplazamiento, la flotabilidad, el peso y dimensiones máximas, la tecnología de comunicaciones, los instrumentos de navegación, los sistemas auxiliares, entre otros. Para el proceso de diseño, el sistema ROV es dividido en cinco diferentes subsistemas, Figura 2.

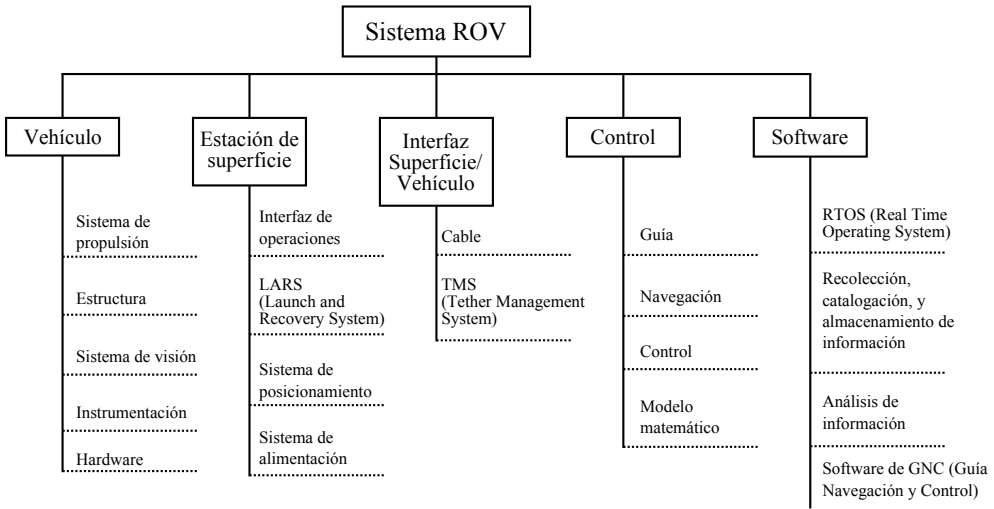


Figura 2: Arquitectura del sistema ROV

Para cada uno de estos subsistemas se muestra la división propuesta, considerando los elementos más determinantes que deben ser considerados desde la fase de diseño conceptual. El vehículo es el encargado de realizar las tareas bajo el agua. La estación de superficie provee una interfaz con el

operador y contiene la infraestructura mecánica y de potencia requerida en superficie para que operen el vehículo y los demás subsistemas. La interfaz superficie/vehículo permite la conexión entre el vehículo y la estación en superficie. El sistema de control es transversal a todos los subsistemas y es el encargado de los algoritmos que le dan inteligencia al sistema ROV. El software también es transversal a todos los subsistemas y provee la infraestructura informática que permite las comunicaciones, la captura, manejo y procesamiento de información, y el control.

3 Vehículo

El vehículo está encargado de efectuar tareas como inspección visual, medición y toma de muestras bajo el agua. Físicamente representa el robot móvil que es controlado remotamente desde la estación en superficie, e incluye los sistemas de propulsión, estructura, visión, instrumentación y hardware [1].

3.1 Sistema de propulsión

El sistema de propulsión tiene la tarea de llevar el ROV al lugar donde se realizará la tarea una vez ha sido puesto en el agua. También debe permitir movimientos cortos y precisos del vehículo en diferentes direcciones durante la realización de la misión. La función de cada elemento propulsor es generar empuje en una dirección. Se pueden encontrar en diferentes cantidades y configuraciones. Existen dos configuraciones básicas: propulsores en línea y propulsores vectorizados [1]. Los propulsores en línea están alineados con las direcciones principales de movimiento y los vectorizados están inclinados.

Uno de los parámetros importantes para el diseño del vehículo es la selección del número de grados de libertad controlables que son necesarios para realizar las operaciones planeadas, dado que esto representa el número de movimientos independientes que éste puede tener en el espacio tridimensional. La cantidad y configuración de los propulsores influye en el diseño de algoritmos de control [24]. La configuración del sistema de propulsión también afecta el diseño de la estructura y la distribución de los otros componentes del vehículo, ya que no deben obstaculizar la acción del propulsor.

Debe garantizarse que el empuje total sea suficiente para mover el vehículo a través de las corrientes que se puedan presentar en el lugar de operación. Es indispensable que el sistema de propulsión sea robusto y confiable, ya que una falla de éste imposibilita por completo llevar a cabo la misión o dificulta la recuperación del ROV.

Los propulsores pueden tener motores eléctricos o hidráulicos, y propelas o propulsión a chorro [25],[26]. Existe una amplia variedad de fabricantes, de modo que una opción para este sistema es realizar una correcta búsqueda y selección de los mismos a partir de catálogos comerciales. Otra alternativa es el diseño y desarrollo del propulsor.

3.2 Estructura

La estructura del vehículo debe cumplir con la tarea de proteger, sostener y asegurar la estanqueidad de los componentes internos [27]. Asimismo, tiene como tarea regular la flotabilidad y estabilidad hidrostática del vehículo. Su diseño, además, afecta el comportamiento hidrodinámico. Este comportamiento a su vez afecta el diseño del módulo de propulsión y del sistema de control.

La estructura está conformada por uno o más compartimentos estancos, un marco protector, elementos reguladores de flotabilidad y pasacascos para cables de control y potencia [1]. Los compartimentos estancos aseguran la estanqueidad de los componentes internos, que usualmente son elementos de hardware electrónico. Asimismo deben contar con tres características importantes: la capacidad estructural de los materiales para soportar presión hidrostática, la capacidad de los recubrimientos para atenuar la corrosión y contar con sellos estáticos que eviten filtraciones de líquido hacia el interior [28]. Dentro de los componentes protegidos y asegurados por la estructura están los que desarrollan tareas específicas de la misión de exploración. Estos elementos se conocen como carga útil, y no son considerados en este trabajo.

El marco protector cumple con varias funciones: sostener los compartimientos estancos, proteger los compartimientos estancos de posibles impactos con el entorno y contar con puntos de agarre que faciliten la manipulación del vehículo. El marco debe tener buenas prestaciones de resistencia

mecánica en términos de esfuerzos y corrosión.

Los reguladores de flotabilidad deben ser considerados en el diseño ya que estos se encargan del balanceo de las fuerzas peso y empuje [29], y se busca que la flotabilidad sea neutra. Esto hace que la regulación de profundidad se realice con el sistema de propulsión. Una dificultad inherente a esta función radica en el hecho de que el empuje varía con la densidad del entorno y esta densidad es sensible a la temperatura, la salinidad y la presencia de otros contaminantes [30].

La forma y tamaño que tenga en general la estructura influye en la dinámica del vehículo [31],[32]. Debido a que la flotabilidad es neutra, el peso y el volumen del vehículo están interrelacionados, un vehículo grande es pesado, por ende tiene mayor inercia y es más difícil de acelerar por parte de los propulsores. La forma altera el comportamiento hidrodinámico, lo que limita la velocidad que puede alcanzar el vehículo debido a la acción de cargas hidrodinámicas. La ubicación del centro de masa y el centro de flotabilidad (centro de volumen) alteran la orientación del vehículo en condiciones estáticas y la posibilidad de estabilizar su orientación de forma natural [1],[29].

3.3 Sistema de visión

Los sistemas de visión se usan en el ROV para la navegación y la exploración de ambientes submarinos. En la navegación se utiliza para que el operario pueda identificar el entorno en el que se mueve el vehículo y en la exploración para obtener información que posteriormente será analizada. El sistema de visión está formado por dispositivo de visión, sistema de almacenamiento y software para procesamiento de imágenes. El dispositivo de visión está conformado normalmente por una o varias cámaras de video con un sistema de iluminación [1]. Con el sistema de almacenamiento se guarda el recorrido completo de la misión y posteriormente se procesa con un software especializado.

Las cámaras de video más usadas son del tipo CCD (*Charge Coupled Device*) ya que son de mayor resolución y más sensibles a la luz [33],[34]. Se selecciona teniendo en cuenta criterios como: ubicación, tipo de transmisión del video, tamaño, resolución, tipo de lente, zoom, alimentación, protocolos

de comunicación, formato de video almacenado y forma de anclaje. La iluminación se selecciona en función de la potencia y del tipo de tecnología empleada [35].

El sistema de visión afecta al módulo TMS (*Tether Management System*) porque este provee el medio de transmisión del video. También afecta al vehículo por tamaño y peso y el diseño del mismo según la ubicación.

3.4 Instrumentación

En este contexto, la instrumentación es la encargada de medir todas las variables relacionadas con la navegación y seguridad del ROV. Para la navegación del ROV se necesita conocer la posición, la orientación y la velocidad, las cuales se obtienen con sensores tales como correntómetros, profundímetro, termómetro, altímetro y unidad inercial (acelerómetros, giróscopos, magnetómetro); se usa el sistema GPS para la ubicación de la estación en superficie [36],[34]. De igual forma es recomendable realizar el monitoreo de algunas variables que permiten evaluar la operación segura del ROV, como son temperatura y presión interna y detectores de inundación.

Para la selección de los instrumentos de medición es necesario tener un buen conocimiento sobre las tareas que se realizarán con el ROV para así evaluar las características estáticas, dinámicas y electromecánicas de los instrumentos de medida. Las estáticas incluyen: sensibilidad, rango, resolución, repetibilidad, exactitud y linealidad. Las dinámicas incluyen: velocidad de respuesta y tiempo muerto. Las electromecánicas incluyen: material, peso, alimentación, consumo de energía, señal de salida y protocolos de comunicación.

La instrumentación afecta directamente al hardware ya que se requiere de acondicionamiento, adquisición de datos, alimentación y conectores para su correcto funcionamiento. También afecta el subsistema de control que opera en función de las mediciones realizadas, y al subsistema software debido a la cantidad de datos que se transmiten. Dado que algunos sensores están ubicados en la parte externa del vehículo, es necesario incluir en el diseño de la estructura componentes pasacable para conectar cada uno de los sensores. Finalmente debe considerarse que el consumo de energía de

los sensores afecta el dimensionamiento del sistema de alimentación.

3.5 Hardware

El hardware es el núcleo del ROV ya que concentra toda la información que se transmite entre los diferentes subsistemas [37]. Está conformado por sistema de procesamiento a bordo, convertidores, *drivers* o controladores, transeptores, sistema de adquisición de datos y conectores.

El sistema de procesamiento a bordo es el cerebro del ROV. El sistema seleccionado debe contar con la posibilidad de ejecutar los algoritmos de control, navegación y almacenamiento de información, y se enlaza con la estación en superficie usando un estándar de comunicación que puede ser Ethernet a través de fibra óptica [38]. Para la selección del sistema de procesamiento a bordo se consideran: costo, arquitectura, capacidad de procesamiento, protocolos de comunicación, sistema operativo, necesidades de memoria, flexibilidad, entre otros.

Los convertidores se dividen en dos grupos, convertidores de AC/DC (*Alternating Current/Direct Current*) y convertidores de DC/DC. El primer grupo toma la fuente de alimentación externa en AC y realiza la conversión a los diferentes niveles de voltaje de DC en función de las cargas a alimentar. El convertidor DC/DC toma uno de los niveles de alimentación de DC y lo regula para fuentes de alimentación de DC más específicas y críticas [34],[39],[40]. Los drivers o controladores convierten las señales de control en señales de potencia para manipular la velocidad de los motores y de esta forma controlar la dirección y velocidad del ROV.

Los transeptores son utilizados en las comunicaciones entre la estación de superficie y el ROV. Su función es hacer la conversión de Ethernet a fibra óptica y de fibra óptica a Ethernet [41],[42]. Su selección depende del tipo de fibra óptica con que se cuente (monomodo, multimodo) y de la velocidad de transmisión de la información. El sistema de adquisición de datos (DAQ—Data Acquisition) es el encargado de adquirir los datos provenientes de la instrumentación.

Los conectores tienen la función de unir elementos en diferentes partes del sistema tales como el hardware dentro del ROV, los elementos en la estación de superficie y el cable. Los conectores utilizados dependen del

tipo de interfaz del que se disponga por ejemplo USB, RS-232, RS-485, Ethernet, Firewire, entre otros.

El hardware afecta todos los sistemas del ROV. Al vehículo ya que aporta peso, a la estación de superficie y software que reciben información de los DAQ, a la interfaz de superficie/vehículo porque para la transmisión de información y de energía se requieren los transeptores y conectores, y al sistema de GNC (guía, navegación y control) porque la ejecución de los algoritmos de control se hacen en el sistema de procesamiento a bordo. A su vez, el tipo de tareas que realiza el sistema de GNC, determina la instrumentación (sensores, actuadores, sistemas complementarios, etc.) que se requieren para el control del vehículo.

4 Estación en superficie

En ésta se encuentran ubicados la interfaz de operaciones, el LARS (*Launch and Recovery System*), el sistema de posicionamiento y el sistema de alimentación.

La interfaz de operaciones agrupa la cabina de operación, los mandos y la interfaz de usuario. Por medio de estos elementos el operario puede interactuar con el vehículo. La cabina de operación contiene pantallas con la imagen del sistema de visión y la información de las variables del control del ROV y mandos o conjuntos de elementos para operar el ROV (HMI, *Human Machine Interface*) [37]. En los mandos por lo general se usan palancas, joysticks y dispositivos como tabletas o dispositivos móviles [43].

Para la creación de la interfaz de usuario (GUI—Graphical User Interface) existen distintos entornos de desarrollo de software. Algunos entornos de desarrollo de propósito general ofrecen librerías de relativamente bajo nivel, las cuales requieren un esfuerzo de desarrollo significativo para la construcción de la aplicación final. Como alternativa existen herramientas comerciales, como LabView® [44], que ofrecen librerías de componentes de alto nivel diseñadas específicamente para el desarrollo de aplicaciones de instrumentación y control.

4.1 Sistema de lanzamiento y recuperación

El sistema de lanzamiento y recuperación (LARS—*Launch and Recovery System*) tiene las tareas de transferir de forma segura el vehículo desde la estación en superficie al agua para iniciar la misión y recuperar el vehículo desde el agua al finalizar la misma.

Cuando el vehículo es lo suficientemente pequeño y liviano (microROV y algunos miniROV) el sistema como tal puede ser efectivamente reemplazado por una persona. En términos más generales el sistema requiere de elementos para izar el vehículo y, debido al movimiento de la marea, también debe incluirse un sistema que lo estabilice con el fin de evitar el movimiento de péndulo que puede provocar daños y situaciones peligrosas. Adicionalmente se debe administrar el cable dependiendo de la posición del vehículo. Es posible que el LARS requiera su propio suministro de energía y paneles de control. Debe garantizarse que la operación de este sistema no ponga en riesgo el balance del barco y se produzca un volcamiento.

Las alternativas más comunes para sistemas ROV son las grúas articuladas, las grúas no articuladas y un tipo especial de grúa pórtico conocido como A-frame. Dependiendo de la alternativa utilizada se utilizan cables auxiliares que se sujetan del vehículo para estabilizarlo.

Este sistema afecta la estructura del vehículo, ya que debe proveer los puntos de sujeción suficientes y capaces para ser izado y estabilizado. El LARS también afecta al cable umbilical, porque administra la longitud del cable durante el lanzamiento y recuperación del vehículo. El uso de un TMS (*Tether Management System*, ver sección 5.2) también influye en el diseño de este sistema, ya que debe ser lanzado y recuperado con el vehículo, por lo que determina la capacidad de carga y tamaño del LARS.

4.2 Sistema de posicionamiento

El sistema de posicionamiento permite determinar la posición del vehículo con respecto a un sistema de referencia inercial ubicado en la estación de superficie. Dadas las características del agua, el desarrollo de este tipo de sistemas de localización subacuática no es trivial y presenta una serie de retos [45]. Este sistema debe ser tenido cuenta desde la etapa de diseño

con el fin de lograr una operación conjunta de movimiento entre la estación de superficie (ubicada normalmente en un buque) y el vehículo sumergible [45],[46],[47].

4.3 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación tiene la función de entregar la energía eléctrica necesaria para los diferentes componentes del sistema ROV. Para el caso específico del vehículo, la literatura reporta dos alternativas: una a través del cable umbilical, y otra con arreglos de baterías internas. Las dos alternativas son usadas, pero la más recomendable para vehículos pequeños (con volumen menor a 1 m^3) es a través del cable umbilical. El sistema tiene dos componentes funcionales: las fuentes y las protecciones [1].

Normalmente se usa sólo una fuente para alimentar el sistema ROV y la selección de ésta se realiza sumando el consumo de cada uno de los subsistemas que lo conforman, adicionando al final un factor de seguridad. La transmisión de la alimentación se puede hacer en AC o en DC, pero cuando se cuenta con longitudes de cables superiores a 1 km se recomienda usar AC [48].

La estructura de alimentación de este tipo de dispositivos es muy compleja, ya que combina grandes longitudes de cables junto con diferentes niveles y tipos de voltaje de alimentación. Por esta razón se requiere contar con un sistema de protección robusto que permita mantener en funcionamiento los componentes más críticos del sistema ROV. Las protecciones se ubican en cada punto de transmisión y conversión en función del consumo de los dispositivos a alimentar.

El sistema de alimentación afecta la estructura, ya que dependiendo de la forma que se realice la alimentación del vehículo se deberá tener o no en cuenta el peso de las fuentes y demás componentes de este sistema. También afecta la instrumentación y el hardware debido a la posibilidad de disipación de calor y propagación de ruido eléctrico.

5 Interfaz superficie/vehículo

La interfaz superficie/vehículo es el enlace físico por el que se transmiten los datos y la alimentación. Está conformada por el cable y el TMS que enlazan al vehículo con la estación de superficie.

5.1 Cable

El cable tiene como funciones generales suministrar la energía eléctrica al vehículo, establecer la comunicación en doble vía entre la superficie y el vehículo y permitir una conexión física entre ambos que puede ser utilizada para el lanzamiento y recuperación.

Hay dos tipos de cable: el cable umbilical y el cable tether. El cable umbilical es normalmente un cable con flotabilidad negativa y en el que es importante considerar su resistencia a tracción. Este es el cable que normalmente estaría relacionado con el LARS y puede llegar a usarse como cable de izado. El cable tether es generalmente de flotabilidad neutra para anular los efectos de arrastre por peso sobre el ROV; se busca que sea muy flexible para que no influya sobre la controlabilidad del vehículo.

La configuración más simple utiliza únicamente un cable tether que se encarga de unir la estación de superficie con el vehículo. En configuraciones más complejas se usa un cable umbilical que une a la estación de superficie con el TMS y un cable tether que une el TMS con el vehículo.

Para garantizar la transmisión de energía cada cable debe contar con los hilos conductores necesarios para alimentar el vehículo y el TMS. La selección del calibre de los hilos depende de la potencia de consumo y del tipo de señal.

En cuanto a la transmisión de información, existen varias alternativas para definir el medio que permite establecer el sistema de comunicaciones, las más comunes son: acústico, par trenzado y fibra óptica. Siendo esta última una tecnología que permite velocidades superiores a 1 Gbps y distancias superiores a los 10 km sin necesidad de retransmisores.

En cuanto a sus características físicas, el cable debe soportar las condiciones ambientales y de operación sin que se degraden sus propiedades mecánicas y su capacidad de transmisión de energía e información. Algunas

de las condiciones a las que puede estar expuesto son: gradientes de temperatura, corrosión por salinidad, rozamiento por el uso de malacates y con otros elementos, tensiones por corrientes y mareas y tensiones provocadas en las maniobras de lanzamiento y recuperación.

5.2 Sistema de manejo del cable *tether*

El sistema de manejo del cable *tether* (TMS—*Tether Management System*) es una unidad intermedia que une al cable umbilical con el cable *tether*. Vehículos que operen a grandes profundidades y con excursiones de larga distancia usualmente requieren un TMS.

El TMS puede llevar a cabo varias funciones: manejar el cable *tether* del vehículo por medio de un tambor (malacate), proteger el vehículo durante el lanzamiento y recuperación, desacoplar al vehículo de los posibles movimientos del buque o plataforma marítima, reducir los efectos del arrastre del cable umbilical sobre el vehículo y proveer un punto de referencia para el sistema de localización [37].

El sistema de interfaz superficie/vehículo afectan al vehículo porque la estructura requiere conexiones para el cable, al hardware porque los transceptores y los conectores dependen del tipo de cable utilizado. También al sistema estación de superficie porque el LARS tiene que administrar la longitud del cable durante la misión y al sistema control porque el peso y el arrastre del cable afectan la dinámica del vehículo. Este sistema se ve afectado por el vehículo porque el calibre del hilo conductor depende del consumo de energía y por el peso del conjunto vehículo y TMS porque con éste se define la resistencia mecánica necesaria.

6 Sistema de guía, navegación y control

El sistema de guía, navegación y control (GNC) permite controlar los movimientos y la ejecución de las tareas requeridas durante la operación del vehículo [49],[50]. El sistema de GNC puede tener diferentes grados de sofisticación, según el tipo de operaciones que se desea realizar y según el nivel autonomía que se quiere alcanzar. El nivel de autonomía deseado, determina qué tipo de algoritmos son necesarios para tener control de las

variables de interés, las cuales normalmente están dadas por la posición, actitud (orientación) y velocidad del vehículo con respecto a un sistema de referencia inercial ubicado en la superficie [51].

La Figura 3 muestra una estructura jerárquica de GNC para un vehículo subacuático constituida por tres niveles, en cada uno de los cuáles se ejecutan diferentes tareas [52].

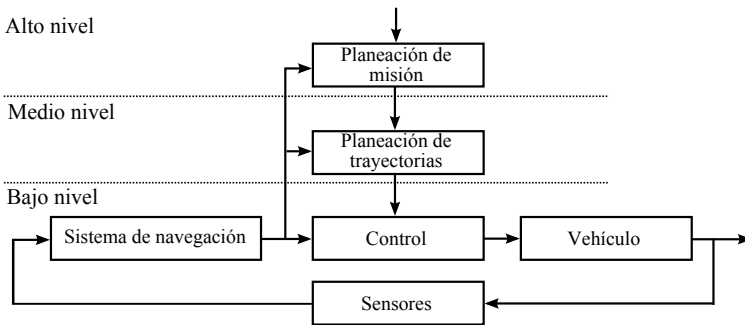


Figura 3: Estructura de control para un vehículo subacuático

6.1 Sistema de guía

El nivel más alto de la estructura de control contiene el planeador de misiones (y se ejecuta en la estación de superficie), las cuáles son motivadas por los requerimientos de operación que tiene el vehículo según su aplicación. En general se busca que este componente sea fácilmente programable y que permita priorizar el desempeño, la seguridad y la capacidad de respuesta que tendrá el vehículo [53]. La mayoría de las labores realizadas por un vehículo subacuático son especificadas punto a punto en una región limitada [54]. En el nivel medio de la estructura de control se realiza la planeación de trayectorias, es decir, la determinación de los puntos y orientaciones en los que debe estar el vehículo y las historias de tiempo que deben ser seguidas por los controladores de bajo nivel [55]. Este componente se encarga de producir los comandos necesarios para que el vehículo se desplace desde un punto inicial hasta un punto final bajo una serie de restricciones [56]. Existen diversas metodologías para realizar la generación de trayectorias,

entre ellas las que proponen algoritmos que permiten calcular trayectorias eficientes basados en el control geométrico del vehículo [50] y metodologías basadas en computación evolutiva [56].

6.2 Sistema de navegación

Uno de los principales elementos ubicados en el nivel bajo de la estructura de control es el sistema de navegación. Éste permite estimar la posición, velocidad y actitud del vehículo, con respecto a un sistema inercial ubicado en la estación de superficie, a partir de las mediciones realizadas con los diferentes sensores mencionados en la Sección 3.4. El Filtro de Kalman es un estimador, estadísticamente óptimo con respecto a una función cuadrática del error, que permite determinar el estado del vehículo [57]. Durante varios años se han desarrollado sistemas de navegación para vehículos subacuáticos que están basados en el Filtro de Kalman, o en variaciones de éste [58],[59],[60],[61],[62].

6.3 Algoritmos de control

En este componente del nivel más bajo de la estructura se ejecuta el conjunto de algoritmos que permiten realizar la estabilización de las variables de estado, y seguir las trayectorias generadas en el nivel medio. El control de un vehículo subacuático es complejo dado que existen efectos hidrodinámicos no lineales que resultan de la interacción con el medio y que en muchas ocasiones no es posible cuantificar [63]. Cohan [9] determinó que el desarrollo de sistemas de control para ROV es un tema actual y con futuro de desarrollo promisorio, lo cual se puede constatar con el número de trabajos que se encuentran en la literatura, entre estos [58],[64],[65],[66].

6.4 Modelo matemático del vehículo

El desarrollo de sistemas de GNC para vehículos subacuáticos se basa, normalmente, en las ecuaciones de movimiento en el espacio tridimensional bajo la superficie. El modelo matemático que representa el comportamiento

dinámico es altamente dependiente de los parámetros hidrodinámicos que aparecen por la interacción con el medio en el que se desplaza el vehículo [18]. Estos parámetros son importantes para el diseño del sistema de control y es posible encontrar en la literatura diversos trabajos que muestran diferentes metodologías para la determinación e identificación del modelo matemático [67],[68],[69].

7 Software

El software es un subsistema transversal que aparece como parte integral de muchos otros sistemas. En concreto, se requiere software para la operación del sistemas de GNC, para la captura de datos y transmisión de datos en tiempo real a la estación de superficie, para las interfaces de usuario ubicadas en el puesto de control, y para los sistemas de almacenamiento, recuperación y análisis de información.

7.1 Sistema operativo de tiempo real (RTOS)

El procesador a bordo del vehículo se encarga de ejecutar los algoritmos de control que regulan la velocidad y mantienen la posición deseada. También es responsable del manejo de sensores para la captura de datos y el control de los propulsores. Por último, se encarga de la comunicación de datos con la estación de superficie. Todas estas tareas exigen que el subsistema de procesamiento a bordo cumpla con requerimientos de operación en tiempo real, razón por la cual se considera como un componente fundamental el disponer de un sistema operativo de tiempo real (RTOS—*Real Time Operating System*) que garantice el cumplimiento de estos requerimientos.

Entre las consideraciones que deben tenerse en cuenta para la selección del RTOS se encuentran [70]: planificación de procesos en tiempo real, muestreo de sensores, manejo de actuadores, comunicaciones con la estación en superficie, etcétera.

Existe una gran variedad de RTOS que pueden utilizarse para aplicaciones de control en plataformas robóticas. Entre los más utilizados se encuentran VxWorks, QNX, ChibiOS/RT, FreeRTOS, $\mu\text{C}/\text{OS-II}$, y algunas

extensiones para dar soporte de tiempo real a Linux, tales como RTLinux, RTIA y Xenomai.

7.2 Recolección, catalogación y almacenamiento de información

La plataforma de exploración submarina tiene unos requerimientos de procesamiento de información exigentes: los datos de los distintos sensores se deben capturar y entregar a los sistemas de control y supervisión en tiempo real, deben estar disponibles en línea para que el operador cuente con información actualizada que le permita tomar decisiones oportunas sobre la operación del vehículo, y debe almacenar la información capturada, más posibles metadatos asociados (por ejemplo geolocalización) de manera segura para permitir procesos posteriores de análisis.

7.3 Software de guía, navegación y control

El desarrollo de arquitecturas de software de control para ROV es una tarea difícil [71]. El software tiene diversas tareas y según Gutiérrez et al. [21] entre ellas se cuentan: leer los datos provenientes de los sensores, ejecutar el sistema de navegación, actualizar comandos provenientes del generador de trayectorias, ejecutar los algoritmos de control, enviar señales a los propulsores, comunicarse con la estación en superficie, etc. El ROV debe ser monitoreado desde la estación en superficie a través de la interfaz de usuario, cuyo desarrollo depende de las variables que se quieran visualizar y de las tareas que se quieren ejecutar comandadas desde la superficie.

8 Conclusiones

En este trabajo se presentó una arquitectura para el diseño conceptual de sistemas utilizados para exploración subacuática. El trabajo fue basado en la experiencia obtenida durante un periodo de 20 años con el desarrollo de tres ROV de Clase I. Se realizó una división del sistema ROV en subsistemas, y se listaron las consideraciones más relevantes que deben tenerse en cuenta en la primera etapa de diseño.

Un sistema ROV es complejo dada la interacción que está presente entre subsistemas. Si bien es posible adquirir elementos comerciales para su desarrollo, la integración de estos no es trivial y su proceso de diseño requiere múltiples iteraciones y debe ser abordado por un equipo interdisciplinar de trabajo, conformado por las diferentes disciplinas básicas que conforman la robótica: mecánica, electrónica, control e informática. La arquitectura propuesta no se encuentra normalmente en la literatura y obedece a un trabajo en equipo arduo realizado por los autores.

Esta arquitectura aclara conceptualmente el problema de diseño del sistema ROV, y establece un punto de partida para el desarrollo adecuado de las etapas de diseño básico y diseño de detalle. Esto se hace con el fin de garantizar que el sistema robótico de exploración que sea construido cumpla con los requerimientos de operación establecidos, evitando reprocesos en la fase de fabricación y problemas en la fase puesta a punto y operación.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado con la financiación del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas; la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPEPETROL; la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, a través del Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, proyecto 1210-531-30550 (Contrato 0265-2013).

Referencias

- [1] R. Christ and R. Wernli, *The ROV Manual. A User Guide for Remotely Operated Vehicles*, 2nd ed. Elsevier, 2013. 74, 77, 78, 79, 84
- [2] NORSOK, *NORSOK STANDARD U-102*, Norwegian Technology Centre Std., 2012, 2nd Ed. [Online]. Available: <http://www.standard.no/petroleum> 74
- [3] J. Ferguson and E. Jackson, "Design and development of a diesel-powered semisubmersible ROV," in *Proceedings of the 3rd International Symposium*

- on *Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, New Hampshire, 1983, pp. 39–52. 74
- [4] G. Smith, “Development of a 5000 meter remote operated vehicle for marine research,” in *Proceedings of the IEEE OCEANS1987*, 1987. 74
- [5] J. Newman and D. Stakes, “Tiburón: development of an ROV for ocean science research,” in *Proceedings of the IEEE OCEANS1994*, vol. 2, Sep 1994, pp. 483–488. 74
- [6] A. Frost, A. McMaster, K. Saunders, and S. Lee, “The development of a remotely operated vehicle (ROV) for aquaculture,” *Aquacult. Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 461 – 483, 1996. 74
- [7] M. Nakamura, H. Kajiwara, and W. Koterayama, “Development of an ROV operated both as towed and self-propulsive vehicle,” *Ocean Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 1 – 43, 2001. 74
- [8] R. Gomes, A. Martins, A. Sousa, J. Sousa, S. Fraga, and F. Pereira, “A new ROV design: issues on low drag and mechanical symmetry,” in *Proceedings of the IEEE OCEANS2005*, vol. 2, June 2005, pp. 957–962 Vol. 2. 74
- [9] S. Cohan, “Trends in ROV development,” *Mar. Technol. Soc. J.*, vol. 42, no. 1, pp. 38–43, 2008. 74, 88
- [10] F. Cazenave, R. Zook, D. Carroll, M. Flagg, and S. Kim, “Development of the ROV SCINI and deployment in McMurdo sound, Antarctica.” *J. Ocean Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 39 – 58, 2011. 74
- [11] N. Cruz, , A. Matos, R. Almeida, B. Ferreira, and N. Abreu, “TriMARES - a hybrid AUV/ROV for dam inspection,” in *Proceedings of the IEEE OCEANS2011*, 2011, pp. 1–7. 74
- [12] A. Y. Martin, “Unmanned maritime vehicles: Technology evolution and implications,” *Mar. Technol. Soc. J.*, vol. 47, no. 5, pp. 72–83, 2013. 75
- [13] G. Gereffi, L. C. Brun, J. Lee, and M. Turnipseed, “Nova Scotia’s ocean technologies,” Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University, Tech. Rep., 2012. 75
- [14] T. Salgado-Jimenez, J. Gonzalez-Lopez, L. Martinez-Soto, E. Olguin-Lopez, P. Resendiz-Gonzalez, and M. Bandala-Sanchez, “Deep water ROV design for the Mexican oil industry,” in *Proceedings of the IEEE OCEANS2010*, 2010, pp. 1–6. 75
- [15] L. Garcia-Valdovinos and T. Salgado-Jimenez, “On the dynamic positioning control of underwater vehicles subject to ocean currents,” in *8th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2011, pp. 1–6. 75

- [16] P. Drews, V. Kuhn, and S. Gomes, "Tracking system for underwater inspection using computer vision," in *2012 International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation (NAVTEC)*, 2012, pp. 27–30. 75
- [17] W. Lages and V. de Oliveira, "A survey of applied robotics for the power industry in Brazil," in *2nd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, 2012, pp. 78–82. 75
- [18] J. P. Avila, D. C. Donha, and J. C. Adamowski, "Experimental model identification of open-frame underwater vehicles," *Ocean Eng.*, vol. 60, no. 0, pp. 81 – 94, 2013. 75, 89
- [19] R. Cadavid, R. Vallejo, and J. C. Zapata, "VISOR: Vehículo para investigación subacuática operado remotamente," Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Tech. Rep., 1995. 75
- [20] J. C. Correa, L. B. Gutiérrez, and L. J. Vásquez, "Consideraciones de diseño para un vehículo subacuático controlado en forma dual: autónomamente y vía cable," in *Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Control Automático*. Viña del Mar: ACCA, 1998. 75
- [21] L. B. Gutiérrez, C. A. Zuluaga, J. A. Ramírez, R. E. Vásquez, D. A. Flórez, E. A. Taborda, and R. A. Valencia, "Development of an underwater remotely operated vehicle (ROV) for surveillance and inspection of port facilities," in *Proceedings of the ASME IMECE2010*, 2010. 75, 90
- [22] M. Vélez, V. Bernal, V. Díaz, and J. Contreras, "Generación automática de controladores difusos: Aplicación al control de profundidad de un ROV," in *Memorias del Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica*, 2009. 75
- [23] D. Madero and J. J. Durán, "Diseño de un prototipo ROV (remotely operated vehicle) subacuático experimental," Trabajo de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Tech. Rep., 2012. 75
- [24] W. M. Bessa, M. S. Dutra, and E. Kreuzer, "Dynamic positioning of underwater robotic vehicles with thruster dynamics compensation," *Int.l J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, no. 325, pp. 1–8, 2013. 77
- [25] B. DeWijts, "AUV/ROV propulsion thrusters," in *Proceedings of the IEEE OCEANS2000*, 2000, pp. 173–176. 78
- [26] S. M. Abu-Sharkh, *Propulsion Systems for AUVs*. Taylor & Francis, 2003, ch. 7, pp. 109 – 125. 78

- [27] Y. Li, P. Wang, L. Ai, X. Sang, and J. Bu, "Hull design and structural analysis of an underwater robotic vehicle," *Adv. Mat. Res.*, vol. 291-294, pp. 1917–1920, 2011. 78
- [28] A. D. Bowen, D. R. Yoerger, L. L. Whitcomb, and D. J. Fornari, "Exploring the deepest depths: Preliminary design of a novel light-tethered hybrid ROV for global science in extreme environments," *Mar. Technol. Soc. J.*, vol. 38, no. 2, pp. 92–101, 2004. 78
- [29] E. E. Allmendinger, M. De La Vergne, and H. A. Jackson, *Hydromechanical Principles*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990, ch. V, pp. 191 – 269. 79
- [30] J. D. Irish and W. S. Brown, *The Environment*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990, ch. III, pp. 71 –108. 79
- [31] J. Yuh, "Design and control of autonomous underwater robots: A survey," *Auton. Robots*, vol. 8, no. 1, pp. 7–24, 2000. 79
- [32] R. A. Valencia, J. A. Ramírez, L. B. Gutiérrez, and M. J. García, "Modeling and simulation of an Underwater Remotely Operated Vehicle (ROV) for surveillance and inspection of port facilities using CFD tools," in *Proceedings of the ASME OMAE2008*, 2008. 79
- [33] J.-Y. Park, B. huan Jun, P. mook Lee, and J. Oh, "Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera," *Ocean Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 48 – 61, 2009. 79
- [34] L. Marsh, J. T. Copley, V. A. Huvenne, P. A. Tyler, and the Isis ROV Facility, "Getting the bigger picture: Using precision remotely operated vehicle (rov) videography to acquire high-definition mosaic images of newly discovered hydrothermal vents in the southern ocean," *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 92, no. 0, pp. 124 – 135, 2013. 79, 80, 81
- [35] S. Shen, H. Huang, C. Chao, and M. Huang, "Design and analysis of a high-intensity LED lighting module for underwater illumination," *Appl. Ocean Res.*, vol. 39, no. 0, pp. 89–96, 2013. 80
- [36] G. Griffiths, "Steps towards autonomy: From current measurements to underwater vehicles," *Meth. Oceanography*, vol. 1-2, no. 0, pp. 22 – 48, 2012. 80
- [37] Y. Bai and Q. Bai, "Subsea engineering handbook," in *Subsea Engineering Handbook*, Y. Bai and Q. Bai, Eds. Boston: Gulf Professional Publishing, 2010, pp. 3 – 25. [Online]. Available:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856176897100019>
81, 82, 86
- [38] T. Kim and J. Yuh, “Development of a real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions,” *Control Eng. Pract.*, vol. 12, no. 12, pp. 1521–1530, 2004. 81
- [39] O. Hasvold, N. J. Storkersen, S. Forseth, and T. Lian, “Power sources for autonomous underwater vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 162, no. 2, pp. 935–942, 2006. 81
- [40] A. Lecroart, L.-P. Doyle, R. Michel, and J.-P. Odier, “Power and optical communications for long tie-backs,” *Nucl. Instrum. Meth. A*, vol. 602, no. 1, pp. 246 – 251, 2009. 81
- [41] J. Lygouras, A. Kapsopoulos, and P. Tsalides, “High speed rs-232 fibre optic communication system for underwater remotely operated vehicles,” *Microprocess. Microsys.*, vol. 19, no. 3, pp. 115 – 120, 1995. 81
- [42] M. C. Domingo and R. Prior, “Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks,” *Comput. Commun.*, vol. 31, no. 6, pp. 1227 – 1238, 2008. 81
- [43] H. Shim, B. Jun, P. Lee, H. Baek, and J. Lee, “Workspace control system of underwater tele-operated manipulators on an ROV,” *Ocean Eng.*, vol. 37, pp. 1036–1047, 2010. 82
- [44] National Instruments, “LabVIEW system design software,” <http://www.ni.com/labview>, National Instruments, 2013. 82
- [45] H.-P. Tan, R. Diamant, W. K. Seah, and M. Waldmeyer, “A survey of techniques and challenges in underwater localization,” *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 14-15, pp. 1663 – 1676, 2011. 83, 84
- [46] A. Alcocer, P. Oliveira, and A. Pascoal, “Study and implementation of an EKF GIB-based underwater positioning system,” *Control Eng. Pract.*, vol. 15, no. 6, pp. 689 – 701, 2007. 84
- [47] H.-H. Chen, “In-situ alignment calibration of attitude and ultra short baseline sensors for precision underwater positioning,” *Ocean Eng.*, vol. 35, no. 15, pp. 1448 – 1462, 2008. 84
- [48] S. Ohata, K. Ishii, H. Sakai, T. Tanaka, and T. Ura, “An autonomous underwater vehicle for observation of underwater structure,” *Int. Congr. Ser.*, vol. 1291, no. 0, pp. 277 – 280, 2006. 84
- [49] G. Roberts, “Trends in marine control systems,” *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 263 – 269, 2008. 86

- [50] M. Chyba, T. Haberkorn, R. Smith, and S. Choi, "Design and implementation of time efficient trajectories for autonomous underwater vehicles," *Ocean Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 63 – 76, 2008. 86, 88
- [51] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, 1994. 87
- [52] J.-H. Li, B.-H. Jun, P.-M. Lee, and S.-W. Hong, "A hierarchical real-time control architecture for a semi-autonomous underwater vehicle," *Ocean Eng.*, vol. 32, no. 13, pp. 1631 – 1641, 2005. 87
- [53] S. Martin, L. Whitcomb, D. Yoerger, and H. Singh, "A mission controller for high level control of autonomous and semi-autonomous underwater vehicles," in *Proceedings of the IEEE OCEANS2006*, 2006, pp. 1–6. 87
- [54] Z. H. Ismail and M. W. Dunnigan, "A region boundary-based control scheme for an autonomous underwater vehicle," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 18, pp. 2270 – 2280, 2011. 87
- [55] R. P. Kumar, A. Dasgupta, and C. Kumar, "Real-time optimal motion planning for autonomous underwater vehicles," *Ocean Eng.*, vol. 32, no. 11-12, pp. 1431 – 1447, 2005. 87
- [56] M. P. Aghababa, "3D path planning for underwater vehicles using five evolutionary optimization algorithms avoiding static and energetic obstacles," *Appl. Ocean Res.*, vol. 38, no. 0, pp. 48 – 62, 2012. 87, 88
- [57] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering Theory and Practice using MATLAB*, 2nd ed. Wiley, 2001. 88
- [58] M. Caccia and G. Veruggio, "Guidance and control of a reconfigurable unmanned underwater vehicle," *Control Eng. Pract.*, vol. 8, no. 1, pp. 21 – 37, 2000. 88
- [59] M. Blain, S. Lemieux, and R. Houde, "Implementation of a ROV navigation system using acoustic/doppler sensors and kalman filtering," in *Proceedings of the IEEE OCEANS2003*, vol. 3, 2003, pp. 1255–1260 Vol.3. 88
- [60] D. Loebis, R. Sutton, J. Chudley, and W. Naeem, "Adaptive tuning of a kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system," *Control Eng. Pract.*, vol. 12, no. 12, pp. 1531 – 1539, 2004. 88
- [61] J. C. Kinsey, R. M. Eustice, and L. L. Whitcomb, "A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges," in *IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*, 2006. 88

- [62] P.-M. Lee and B.-H. Jun, "Pseudo long base line navigation algorithm for underwater vehicles with inertial sensors and two acoustic range measurements," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 3-4, pp. 416 – 425, 2007. 88
- [63] F. Azis, M. M. Aras, M. Rashid, M. Othman, and S. Abdullah, "Problem identification for underwater remotely operated vehicle (ROV): A case study," *Procedia Eng.*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012. 88
- [64] W. M. Bessa, M. S. Dutra, and E. Kreuzer, "Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 56, no. 8, pp. 670 – 677, 2008. 88
- [65] J. Javadi-Moghaddam and A. Bagheri, "An adaptive neuro-fuzzy sliding mode based genetic algorithm control system for under water remotely operated vehicle," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 1, pp. 647 – 660, 2010. 88
- [66] B. Subudhi, K. Mukherjee, and S. Ghosh, "A static output feedback control design for path following of autonomous underwater vehicle in vertical plane," *Ocean Eng.*, vol. 63, no. 0, pp. 72 – 76, 2013. 88
- [67] J. P. J. Avila and J. C. Adamowski, "Experimental evaluation of the hydrodynamic coefficients of a ROV through morison's equation," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 17-18, pp. 2162 – 2170, 2011. 89
- [68] A. Tiano, R. Sutton, A. Lozowicki, and W. Naeem, "Observer kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle," *Control Eng. Pract.*, vol. 15, no. 6, pp. 727 – 739, 2007. 89
- [69] H.-H. Chen, "Vision-based tracking with projective mapping for parameter identification of remotely operated vehicles," *Ocean Eng.*, vol. 35, no. 10, pp. 983 – 994, 2008. 89
- [70] J. Stankovic and R. Rajkumar, "Real time operating systems," *Real Time Systems*, vol. 28, no. 2-3, pp. 237-253, 2004. 89
- [71] F. de Assis, F. Takase, N. Maruyama, and P. Miyagi, "Developing an rov software control architecture: A formal specification approach," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 3107-3112. 90