

AUTOMATIZACIÓN PARA LAS INDUSTRIAS MARÍTIMAS: UN ESTUDIO DE LA SITUACIÓN EN ESPAÑA

J. Aranda¹, M. A. Armada², P. González de Santos², J. M. de la Cruz³,

¹ Dpt. De Informática y Automática. Fac. Ciencias. UNED. Madrid. España

² Instituto de Automática Industrial. CSIC. Arganda del Rey. Madrid.

³ Dpt. de Arquitectura de Computadores y Automática. Fac. Ciencias Físicas. U. Complutense. Madrid. España

Fax: 34 91 398 66 97. Tel.: 34 91 398 71 48. E-mail: jaranda@dia.uned.es

Resumen: El campo del sector marítimo abarca un gran número de actividades dentro de las cuales tienen cabida muchos de los temas de los que trata la Automática, como son la robótica, la ingeniería de control y la inteligencia artificial. Diversos grupos de investigación españoles y del sector marítimo se han reunido para intercambiar experiencias y problemas. En el trabajo se muestran algunas de las aplicaciones en las que están trabajando estos grupos. *Copyright © 2005 CEA-IFAC*

Palabras claves: sistemas marítimos, robótica submarina, automatización, control.

1. INTRODUCTION

Considerando que la Automática es una disciplina horizontal (con aplicaciones en distintos campos), se planteó realizar un estudio de la situación de la investigación en Automática con aplicaciones para la industria marítima. Esta fue la idea que impulsó la creación de la red temática "AUTOMAR: La Automática en el Sector marítimo-naval" (DPI2002-10620-E). Una de las actividades de esta red ha sido aglutinar grupos de distintas instituciones (Universidades y Centros de Investigación) con personas interesadas en la teoría y aplicaciones de la ingeniería de control, de la robótica y técnicas de inteligencia artificial relacionadas con el campo marítimo. Esto incluye estructuras marinas, sistemas y vehículos subacuáticos autónomos y no autónomos, construcción, buques y otros dispositivos relacionados con el campo marítimo, en donde se consideran aspectos tales como el control de la navegación, monitorización y vigilancia, análisis de fallos, optimización, planificación, sistemas de ayuda, modelado, simulación y arquitecturas de control.

En el intento de acercar las actividades de los grupos de investigación y el sector industrial, se han ido teniendo distintos encuentros, en Santander, Barcelona, Ferrol y Cádiz, con las industrias locales, y por último una Jornada en el CSIC en Madrid sobre "Automática y Sistemas en el Sector Marítimo", presentándose un libro (Aranda, Armada, Cruz, 2004) con trabajos de los distintos grupos, que ponen de manifiesto el estado del arte en los centros de investigación españoles.

En esta comunicación, pretendemos dar una panorámica de este estado del arte.

Para ello, hemos dividido las investigaciones que se han presentado en la Jornada en los siguientes apartados: control de barcos, robótica submarina, y automatización para la construcción.

En las siguientes secciones se presentan los grupos de investigación que trabajan en cada uno de estos apartados, y los problemas que se abordan.

2. CONTROL DE BARCOS

Bajo este epígrafe se están considerando distintos proyectos, que en común tienen el diseño de algún sistema de control. En la red han participado varios grupos que se englobarían dentro de este epígrafe, que corresponde a los Departamentos de: Arquitectura de Computadores y Automática de la Universidad Complutense de Madrid, Informática y Automática de la UNED, Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Cantabria, Ingeniería Industrial de la Universidad de A Coruña, y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los problemas planteados son de control de rumbo, estabilización de buques, posicionamiento dinámico, y monitorización y diagnóstico de fallos.

El control automático de rumbo, o autopilotos, es un problema clásico en el área, que inicialmente ha ido ligado al desarrollo de sistemas de navegación, en concreto a la evolución del girocompás. Uno de los primeros trabajos fue el de Sperry en 1922 correspondiente a un sistema de control de rumbo automático (Sperry 1922). En Roberts et al. (2003) se presenta una revisión del desarrollo y utilización de los autopilotos para buques.

Las acciones de autopiloto o control de rumbo es esencial para alcanzar una determinada posición geográfica, para seguir una trayectoria planificada o para realizar cualquier cambio de rumbo. El control se realiza actuando sobre el timón o cualquier otro dispositivo que permita obtener la trayectoria deseada. Estas acciones varían dependiendo del tipo de buques (petroleros, contenedores, ferries, buques de guerra, etc), de las condiciones de navegación (velocidad del barco, cargas o lastres, paso por zonas restringidas, etc) y las condiciones ambientales (viento, olas, corrientes).

Es por tanto un problema clásico, pero abierto según avanza la tecnología y las condiciones y normativas para la navegación.

El problema de la estabilización mediante sistemas de control de buques se ha planteado cuando estos han alcanzado velocidades altas, a partir de los 40 nudos, que causan que el buque “cabalgue” sobre las olas, produciéndose fuertes aceleraciones, y pantocazos. Comercialmente interesa para los buques rápidos de pasaje, con el principal objetivo de disminuir los movimientos no deseados y aumentar el confort y la seguridad. Estratégicamente también tiene interés en buques de guerra.

Uno de los problemas planteados para la investigación fue el propuesto por la E.N. Bazán (en la actualidad Izar) para un ferry rápido (Cruz et al.

2004), la Figura 1 muestra este barco. Las olas inducen aceleraciones verticales sobre el barco, potencial causante del mareo, y que es uno de los grandes inconvenientes para el pasaje. Además, un excesivo movimiento vertical puede ser peligroso para el buque, causando pantocazos y que la cubierta sea barrida por el agua.



Fig. 1. Ferry rápido para el que se propuso el problema de estabilización de movimientos verticales.

Hay varias formas de suavizar este movimiento, una de ellas es la utilización de apéndices activos para contrarrestar la incidencia de las olas. El problema de control es maximizar la eficiencia de estos apéndices. La Figura 2 muestra el modelo a escala 1/25 con los actuadores, alerones a popa y a proa, en el momento del ensamblaje para la realización de ensayos en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de el Pardo.



Fig. 2. Ensamblaje del modelo a escala para experimentación de un ferry rápido.

El problema de la obtención de modelos matemáticos de las diferentes dinámicas involucradas en el problema (Aranda et al. 2004), y el diseño del control, correspondiente a un problema de optimización multiobjetivo, presentan interesantes desafíos (Pintelon and Shoukens, 2004).

Un tercer problema estudiado en los centros de investigación españoles es el correspondiente a los Sistemas de Posicionamiento Dinámico (SPD). Un SPD es el sistema utilizado para mantener de forma dinámica la posición de un buque o de una estructura “offshore” mediante las hélices de propulsión y turbinas, sin utilizar anclas o dispositivos similares. Una de las causas que hicieron aumentar el interés

por estos sistemas fueron la proliferación de plataformas de perforación en alta mar, pero en la actualidad es una tecnología que está en plena expansión, con multitud de actividades donde tiene interés disponer de SPD. Hay varios grupos de investigación trabajando en problemas de cooperación de vehículos marinos donde es necesario la utilización de SPDs.

La cooperación de vehículos marinos para la realización de tareas tales como: remolque, salvamento, pesca y otros, plantea problemas de control con requisitos como: seguridad, autonomía de los sistemas, manejo de excepciones, reconfigurabilidad, gestión dinámica de los objetivos y otros, que no se corresponden con el control convencional sino con aquellos propios del control inteligente (Antsaklis and Passino 1993; Grupta and Sinha 1996, Harris 1994).

Aunque se han propuesto numerosas técnicas para el control inteligente, la arquitectura de control más conveniente para éstos no ha sufrido un avance tan considerable. Se han realizado algunas propuestas (Acar and Ozguner 1993; Albus 1993; Brokks 1986; Levis 1993; Meystel 1993; Saridis 1989; Zeigler and Chi 1993; Farinelli et al. 2004; Kumar and Stover 2000) pero falta un análisis crítico que permita seleccionar la más adecuada dependiendo del dominio de aplicación.

La coordinación de vehículos marinos se puede ver como un caso particular del problema de coordinación de múltiples robots. En éste ámbito, muchas de las soluciones propuestas están basadas en los sistemas con múltiples agentes. Sin embargo, los primeros se pueden considerar un caso especial de los últimos ya que aquellos operan dentro de un medio físico, y la información del entorno que se percibe por los sensores generalmente es parcial e incompleta y está afectada de incertidumbre. Existen muchos métodos posibles de coordinación, en Franielly et al. (2004) se realiza una clasificación de los sistemas de múltiples robots atendiendo al método de coordinación utilizado. Dadas las características de los sistemas marinos el método más adecuado sería el de sistemas fuertemente coordinados. Estos sistemas se basan en un sistema de señales mediante las cuales los distintos componentes (robots) cambian información. Dependiendo del modo en que se implementa las decisiones de los componentes, en Franielly et al. (2004) los sistemas se clasifican en fuertemente centralizados, débilmente centralizados y distribuidos. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes. La solución fuertemente centralizada es la utilizada en el sistema SAMON (Kumar and Stover 2000), donde se utiliza un conjunto de robots submarinos para exploración y registro de datos. No obstante, esta solución no es robusta a fallos en la comunicación o a operaciones incorrectas del líder o

coordinador primero. Por ello, una solución débilmente centralizada en la que el líder primero no es fijo, si no que se elige de forma dinámica dependiendo de la situación del conjunto de componentes, puede ser una mejor solución. En estos casos el problema se plantea en la elección de la estrategia de selección del líder. Otra solución es la distribuida, en la que cada componente se coordina mediante un protocolo determinado, pero toma las decisiones de forma autónoma. Generalmente, esta solución es la más flexible y robusta a fallos en las comunicaciones o de alguno de los componentes.

Considerando por otra parte, la gran cantidad de dispositivos que embarca un buque (se puede considerar que un barco es equivalente a una factoría flotante, o una pequeña ciudad) se encuentra un campo de investigación muy amplio en su automatización. En este ámbito hay diversos grupos que están realizando investigaciones en el diagnóstico y monitorización de fallos (Universidades de A Coruña y de Cádiz).

3. ROBÓTICA SUBMARINA

Un segundo apartado, donde hay una gran actividad de diferentes grupos españoles, es el concerniente a la robótica submarina. Dentro de este epígrafe se han presentado las actividades de los grupos de la División de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, del Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Grupo de Visión por Computador y Robótica de la Universidad de Girona y el Grupo de Sistemas, Robótica y Visión de la Universidad de les Illes Balears.

Hay que considerar que la robótica submarina es un campo de gran interés por el potencial de aplicaciones que tiene. La siguiente lista (Batlle et al. 2004) muestra un conjunto de aplicaciones en distintos campos:

- Ciencia
 - o Inspección del fondo marino
 - o Respuesta rápida a sucesos oceánicos o geotérmicos
 - o Estudios geológicos
 - o Estudios de la biología marina
- Entorno
 - o Monitorización a largo plazo
 - o Recuperación del entorno
- Industria
 - o Inspección de cascos de buques y tanques
 - o Comunicaciones submarinas e instalación e inspección de cables
 - o Inspección en piscinas de refrigeración en plantas nucleares.

- Construcción y mantenimiento de estructuras submarinas
- Vigilancia subacuática de los bancos de peces
- Inspección de estructuras submarinas (oleoductos, diques, puertos)
- Inspección y evaluación de los recursos oceánicos
- Civil
 - Rescates
 - Pasos [Paseos ζ] de entretenimiento
 - Arqueología subacuática
- Militar
 - Poner y quitar minas marinas a poca profundidad
 - Misiones clandestinas
 - Sensores submarinos no embarcados

Los vehículos subacuáticos han tenido un gran avance en los últimos años como una herramienta para la exploración submarina y la navegación. Desde el punto de vista del control, la naturaleza no lineal del robot subacuático, junto con las incertidumbres en los coeficientes hidrodinámicos, hacen que los vehículos submarinos sean un desafío de control.

Son varias las líneas de investigación abiertas en este campo, donde se han construido diversos tipos de robots.



Fig. 3. Robot submarino Garbí de la Universidad Politécnica de Cataluña.

El grupo de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha centrado en la construcción de una plataforma de bajo coste sin renunciar a altos niveles de eficacia. Uno de sus objetivos es facilitar las tareas del operador humano para tareas de teleoperación que se realizarían con dos brazos de robots (Amat y Casals 1998), la Figura 3 muestra el robot Garbí construido con este propósito. Esto es posible con sólo tres grados de libertad para cada brazo y una capacidad de carga baja, gracias a que el sistema de control del robot está dotado con un sistema de visión estereoscópica. El campo de la visión, y en concreto de la visión estereoscópica, es otra de las líneas de investigación seguidas, buscándose diferentes

técnicas para el posicionamiento mediante visión (García et al. 2001).

Una continuación de la línea comenzada con el robot Garbí es el proyecto URIS de la Universidad de Girona. El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un robot subacuático de pequeño tamaño con el cuál realizar experimentos en campos tales como arquitecturas de control, modelado dinámico y procesamiento de imágenes subacuáticas.

Otro problema muy interesante, y que resulta un nuevo desafío de control, corresponde a la utilización de robots paralelos como robots subacuáticos lo cuál es original y prometedor. Una propuesta es la aplicación de la plataforma paralela de Stewart-Gough (Aracil et al. 2003) como un robot subacuático. Esta plataforma es un mecanismo paralelo de seis grados de libertad, basado en dos anillos que están conectados mediante seis actuadores lineales a través de juntas esféricas y universales. En la Figura 4 se muestran dos configuraciones geométricas diferentes del robot paralelo subacuático (UPR) de la Universidad Politécnica de Madrid.

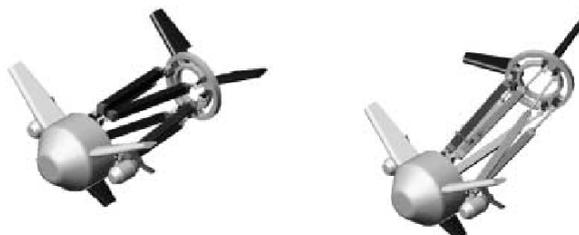


Fig. 4. Diferentes configuraciones del robot paralelo subacuático de la Universidad Politécnica de Madrid.

4. AUTOMATIZACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN

En construcción naval se pueden distinguir claramente dos partes del proceso: Las actividades en taller, donde el grado de mecanización/automatización es elevado, y las actividades en grada o dique que se realizan manualmente o con herramientas semiautomáticas muy precarias.

En esta última etapa deben unirse los bloques fabricados en taller mediante soldadura por arco y al realizarse manualmente aparece diferentes calidades de soldadura -que dependen de la pericia del operario- y, además, la productividad resulta muy baja. La longitud de soldadura de esta parte del proceso supone el 4-6% de la longitud de soldadura total de un barco y, sin embargo, consume el 30-35% de los costes laborales. Un dato adicional son las malas condiciones de trabajo de los operarios que se

realiza en celdas cerradas donde aparecen concentraciones de humos.

Otro de los problemas asociados a las tareas que se realizan en dique son las soldaduras verticales sobre el casco del barco. Estas soldaduras se realizan mediante la instalación de andamios que permiten ascender a los operarios por las paredes exteriores y caras lisas de depósitos. Después de realizar las operaciones de soldadura, inspección, pintura, etc, estos andamios deben retirarse. El costo de las tareas de andamiaje resulta ser, por tanto, muy significativo.

El Instituto de Automática Industrial del CSIC ha atacado la automatización de estos dos problemas: soldadura en las celdas del doble fondo de barcos y soldadura en las caras lisas. El primer desarrollo consiste en el diseño de una plataforma móvil que porta un sistema de soldadura comercial compuesto por un manipulador de 6 grados de libertad que manipula la antorcha de soldadura. El sistema se completa con un sistema de visión estereoscópica y una estación de control que incluye una base de datos con todos los datos referentes a la geometría de la celda y los parámetros de soldadura. La plataforma móvil se basa en un robot cuadrúpedo que puede caminar a lo largo y ancho de la celda anclándose firmemente a los refuerzos de la estructura (la Figura 5 muestra este robot dentro del doble casco de un buque). Esta plataforma lleva instalado en el centro de su cuerpo el sistema de soldadura al que aporta cuatro grados de libertad adicionales (desplazamiento longitudinal, lateral, vertical y giro alrededor de un eje vertical al suelo). La plataforma puede ensamblarse y desensamblarse fácilmente para permitir su introducción en las celdas a través del paso de hombre (600 mm x 800 mm), pesa 400 kg y es capaz de desplazar una carga de 130 kg (González de Santos et al. 2000).

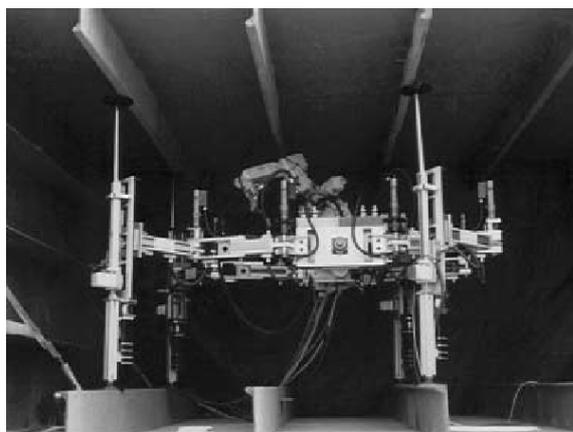


Fig. 5. Robot ROWER dentro del doble casco de un buque.

El segundo proyecto de automatización consiste en el desarrollo de un robot capaz de escalar por superficies ferromagnéticas. Este robot se basa en un

sistema caminante formado por seis patas cuyos pies disponen de electroimanes que le permiten el anclaje a las superficies lisas del barco. Se han utilizado patas para poder sobrepasar los obstáculos que conforman las cornisas que aparecen en los cascos del barco. El robot está dotado de un sistema de soldadura comercial formado por cuatro grados de libertad, la Figura 6 muestra al robot soldando el casco de un buque. El sistema es capaz de desplazarse por superficies con cualquier inclinación e incluso puede trabajar en techos. El cuerpo del robot mide 110 mm x 600 mm, pesa 200 kg y puede portar una carga de hasta 100 kg (Armada et al. 2003).

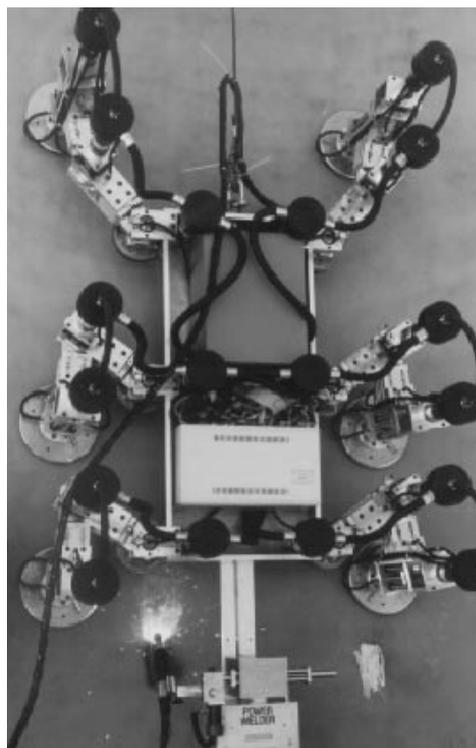


Fig. 6. Robot escalador soldando el casco de un buque.

5. CONCLUSIONES

En este primer estudio de la situación de los grupos españoles de investigación en los campos de la automática marítima podemos concluir que las universidades y centros de investigación españoles tienen una probada capacidad para contribuir a la innovación y desarrollo tecnológicos en aplicaciones del sector marítimo, y no sólo para el control de buques y de sistemas embarcados, sino en temas de robótica para la construcción y reparación, robótica submarina, y sistemas para mantenimiento, operación y situaciones de emergencia.

Quedan abiertos distintos temas: la coordinación de infraestructuras, la realización de actuaciones a nivel internacional, la transferencia a las propias industrias de los conocimientos y experiencia, etc.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos el agradecimiento al Ministerio de Ciencia y Tecnología de España por la financiación de la acción especial DPI2002-10620-E, y a los investigadores de los diferentes centros que nos han acogido en las reuniones y encuentros que se han tenido.

REFERENCIAS

- Acar, L., and U. Ozguner (1993). Design of structure-based hierarchies for distributed intelligent control. En *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. pp. 79–108. Norwell, MA: Kluwer.
- Albus, J.S. (1993). A reference model architecture for intelligent systems design. En *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. pp. 27–56. Norwell, MA: Kluwer.
- Amat, J. and A. Casals (1998). An overview on the main issues dealing with Underwater Robotics, *Int. Workshop on Underwater Vehicles IROS'98*. pp.: 1-8. Victoria (Canada).
- Antsaklis, P. J. and K. M. Passino, Eds., (1993) *An Introduction to Intelligent Autonomous Control*. Norwell, MA: Kluwer, 1993.
- Aracil, R., R. Saltaren, O. Reinoso (2003). Parallel robots for autonomous climbing along tubular structures. *Robotics and Autonomous Systems*, **vol. 42/2** pp.: 125-134.
- Aranda J. Armada M.A., de la Cruz J.M (editores).(2004). Automation for the Maritime Industries. ISBN: 84-609-3315-6.
- Aranda J., de la Cruz J.M. and Díaz J.M. (2004). Identification of Multivariable Models of Fast Ferries. *European Journal of Control* . **Vol 10 no. 2**. Pp.: 187-198.
- Armada M., P. Gonzalez de Santos, M. A. Jimenez and M. Prieto (2003). Application of CLAWAR machines. *The International Journal of Robotics Research*, **Vol. 22, No. 3-4**, pp. 35-43, March-April, 2003.
- Batlle J., Ridaó P., Garcia R., Carreras M., Cufí X., El-Fakci A., Ribas D., Nicosevici T., Balle E., Oliver G., Ortiz A., Antich J. (2004). URIS: Underwater Robotic Intelligent System. En Aranda et al. 2004. Pp.: 177-204.
- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE J. Robot. Automat.*, **vol. RA-2, no. 3**, pp. 14–23, 1986.
- De la Cruz J.M. ,Aranda J., Giron-Sierra J.M., Velasco F., Esteban S., Diaz J.M., de Andres-Toro B. (2004). Improving the Comfort of a Fast Ferry, Smoothing a ship's vertical motion with the control of flaps and T-foil. *IEEE Control System Magazine* . **Abril 2004**. pp. 47-60.
- Farinelli, A., L. Iocchi, D. Nardi, (2004). Multirobot systems: a classification focused on coordination. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, **vol. 34 , n. 5, Oct. 2004**. Pp. 2015-2028.
- García, R., J. Batlle, X. Cufí, and J. Amat (2001). Positioning an underwater vehicle through image mosaicking. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'02*, pp.: 2779-2784. South Korea.
- Gonzalez de Santos P., M.A. Armada and M. A. Jimenez, (2000). Ship building with ROWER. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, **Vol. 7, No. 4**, Pp. 35-43.
- Gupta M. M. and N. K. Sinha, Eds., (1996) *Intelligent Control: Theory and Applications*. Piscataway, NJ: IEEE.
- Harris, C. J. Ed.,(1994) *Advances in Intelligent Control*. New York: Taylor & Francis.
- Kumar R. and J. A. Stover, (2000). A behavior-based intelligent control architecture with application to coordination of multiple underwater vehicles. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A*, **vol. 30, Nov.2000**. Pp. 767–784.
- Levis, H. (1993). Modeling and design of distributed intelligence systems. En *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Norwell, MA: Kluwer, pp. 109–128.
- Meystel, A. (1993). Nested hierarchical control. En *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Norwell, MA: Kluwer, pp. 129–161.
- Pintelon R. and Schoukens J. (2004). Discussion on: Identification fo Multivariable Models of Fast Ferries. *European Journal of Control* . **Vol 10 no. 2**. Pp.:199-202.
- Roberts G.N., Sutton R., Zirilli A. and Tiano A. (2003). Intelligent ship autopilots – A historical perspective. *Mechatronics*, **vol 13**, pp.: 1091-1103.
- Saridis, G. N. (1989). Analytical formulation of the principle of increasing precision with decreasing intelligence for intelligent machines. *Automatica*, **vol. 25, no. 3**, pp. 461–467.
- Sperry E. (1922). Automatic steering. *Trans SANME*, pp.: 53-57.
- Zeigler B. P. and S. Chi, (1993). Model-based architecture concepts for autonomoussystems design and implementation. En *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Norwell, MA: Kluwer, pp. 57–78.