

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado y Control del Vehículo Autónomo Sumergible del CIDNAV

Autor: Julio Rubén Cañizares Abreu

Tutores: Dr.C. Luis Hernández Santana
Ing. Yunier Valeriano Medina

Santa Clara

2010

“Año 52 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Modelado y Control del Vehículo Autónomo Sumergible del CIDNAV

Trabajo de Diploma presentado en opción al Título Académico de
Ingeniero en Automática

Autor: Julio Rubén Cañizares Abreu
email: jcanizares@uclv.edu.cu

Tutores: Dr.C. Luis Hernández Santana Prof. Titular
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: lhsantana@uclv.edu.cu

Ing. Yunier Valeriano Medina
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: yunierv@uclv.edu.cu

Santa Clara

2010

“Año 52 de la Revolución”



Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Julio Rubén Cañizares Abreu
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Julio Rubén Cañizares Abreu
Autor

Fecha

Boris Luis Martínez Jiménez, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr.C., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“Así como el hierro se enmohece cuando no se le hace trabajar, y el agua se corrompe y con el frío se hiela, de igual manera el talento se echa a perder sin ejercicio.”.

Leonardo Da Vinci

DEDICATORIA

A mis padres, Clara y Jacinto,
por su apoyo y por lo que han logrado hacer de mi persona.

A mi abuela, María Elena (Pocha),
por su cariño sincero e incondicional.

A mi hermano, Julio Antonio,
tu afecto entrañable te convierte en mi hermanito menor.

A mi amigo, Danilo,
solo una muerte tan temprana pudo impedir que estuvieras aquí con tu grupo.

AGRADECIMIENTOS

Hay quien dice que no todos los rostros que vez el día del éxito merecen participar del goce que has alcanzado, otros afirman que solo en la austeridad se descubren los afectos más duraderos y no pocos aseguran que aún aquellos que han sido queridos de forma sincera, con la gloria, olvidan las memorias. Yo creo, como el Apóstol, que “solo perdura y es para bien, la belleza que se crea”, quizás el mejor premio al esfuerzo o el único premio necesario sea el saberse apreciado, reconocido por haber cumplido y motivo de orgullo de los que han estado junto a uno codo con codo al menos durante parte del camino, sobre todo en los momentos más difíciles, ninguno de los que ha estado ahí será jamás olvidado.

Durante la realización de este trabajo muchas personas han brindado sus ideas, sus valoraciones, su apoyo. Mi primer agradecimiento, uno muy sincero, para Yunier Valeriano, a quien más que un tutor he visto como un amigo, capaz de compensar la falta de experiencia con la tenacidad, las ganas de hacer, la convicción de que solo la falta de empeño hace difícil la tarea. Me admira que siendo tan joven tenga esa posición ante la vida.

Un profundo agradecimiento quisiera hacer llegar también a mi otro tutor, al Dr. C Luis Hernández Santana, a quien considero un monstruo de la teoría de control, cátedra de la conducción de un grupo, de la motivación y el sorteo de obstáculos, maestro capaz de ver lo que cada quien a su alrededor puede dar, sin excluir a nadie, convencido de que todos pueden aportar tanto como permita su capacidad y la de aquel que lo guía, atinado en sus valoraciones, firme en sus criterios; alguien a quien admiro de forma verdadera.

Hay un grupo de personas de las que he recibido especial afecto y a las que quiero reconocerles, además de su aporte profesional, el haber constituido durante todo este período mi principal fuente de voluntad y fuerza. A la gente del GARP: a Pablo, Orlando,

Diamir, Luis Mariano, Yidier, a Carlos, Richard, Delvis, a la tropita de cuarto año, a Oscar,..., si alguien se me queda, realmente no es mi intención.

Realmente me siento muy orgulloso de los compañeros de clase con los que me ha tocado cursar la carrera, creo que es un grupo extraordinario, a todos les agradezco el privilegio de compartir estos años de mi vida. También siento una gran admiración por el claustro que me ha impartido clases, no solo me han formado como profesional, han ayudado a forjar mi carácter, a fortalecer mis convicciones, me han permitido apreciar mejor el mundo que me rodea, por todo esto, gracias.

Tampoco puedo olvidar hoy que soy deudor permanente de esta revolución tan grande, de este inmenso país, agradecido estoy pues de la historia de mi Patria y de sus conquistas. Vivo orgulloso de mi pueblo.

No podría concluir esta “declaración” sin agradecer, de la forma más verdadera a mi familia: a mi madre, por dármele todo; a la Pocha y Mati, por estar ahí todo el el tiempo; a mi padre, siempre pendiente de mí. La verdad es que todo el familión me ha brindado un apoyo de incalculable valor, mis tíos, tías, abuelas, mis primos, esos amigos cercanos que son también familia, a todos gracias.

Santa Clara, Cuba, 2010

TAREA TÉCNICA

En la realización de este trabajo se cumplieron las siguientes tareas:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica en la literatura técnica relacionada con los vehículos submarinos.
2. Seleccionar un método de modelado acorde a las posibilidades existentes y a las características del vehículo.
3. Obtener el modelo matemático general del vehículo autónomo.
4. Obtener los modelos que se utilizarán en el control y la navegación del vehículo a partir del modelo dinámico general.
5. Seleccionar y diseñar esquemas de control convencionales para controlar rumbo y profundidad.
6. Simular los lazos de control diseñados.
7. Elaborar un informe final que contenga los resultados alcanzados.

Julio Rubén Cañizares Abreu
Autor

Dr.C. Luis Hernández Santana
Tutor

SÍNTESIS

Los vehículos autónomos subacuáticos son muy utilizados e investigados a nivel mundial debido a sus variadas aplicaciones. Instituciones de nuestro país han mostrado interés en el tema, a pesar de lo cual no se cuenta con un método definido para la creación de autopilotos. El objetivo de este trabajo es la apropiación de una metodología para la obtención del modelo matemático de este tipo de vehículos y a partir de ahí proponer estrategias de control convencionales para garantizar la estabilidad del submarino.

El método de modelado empleado en este trabajo es ampliamente referenciado en la literatura, utilizándose además la identificación experimental de algunos parámetros del modelo de una forma acorde a las posibilidades existentes. Las estrategias de control sintetizadas fueron simuladas cumpliendo con los requerimientos de navegación, probándose una de ellas de forma real, arrojando la misma buenos resultados.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
TAREA TÉCNICA	V
SÍNTESIS	VI
Índice de cuadros	X
Índice de figuras	XI
INTRODUCCIÓN	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. Introducción.	4
1.1.1. Definición.	5
1.1.2. Ejemplos de <i>AUVs</i>	5
1.2. Aplicaciones.	6
1.2.1. Revisión histórica.	7
1.3. Arquitectura general del sistema.	9
1.4. Modelo matemático.	11
1.4.1. Origen de las fuerzas que actúan en el submarino	11
1.4.2. Modelado.	12
1.5. Estrategias de Control.	13
1.6. Consideraciones finales del capítulo.	15
2. MODELADO DEL VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO DEL CIDNAV	16
2.1. Introducción.	16
2.2. Sistemas de coordenadas y notación utilizada.	18

2.3.	Ecuaciones dinámicas de movimiento del vehículo.	20
2.3.1.	Cálculo de los términos del cuerpo rígido.	21
2.3.2.	Cálculo de los términos hidrodinámicos.	22
2.3.3.	Cálculo de los términos hidrostáticos.	27
2.4.	Modelo de los actuadores.	28
2.4.1.	Matriz Configuración de empuje para los actuadores	30
2.5.	Modelo Dinámico Linealizado	31
2.5.1.	Subsistema longitudinal	32
2.5.2.	Subsistema lateral	34
2.5.3.	Subsistema de navegación	36
2.6.	Modelo Dinámico no lineal para <i>AUV</i> del <i>CIDNAV</i>	37
2.6.1.	Identificación experimental de parámetros dinámicos	38
2.7.	Consideraciones finales del capítulo	43
3.	CONTROL DEL VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO DEL <i>CIDNAV</i>	44
3.1.	Introducción	44
3.2.	Lazo de control del actuador	45
3.3.	Lazo de control de profundidad	46
3.3.1.	Esquema de control de profundidad	47
3.3.2.	Ajuste del lazo interno	47
3.3.3.	Ajuste del lazo externo	48
3.4.	Lazo de control de rumbo	49
3.4.1.	Ajuste del lazo de control	50
3.5.	Análisis económico	51
3.6.	Consideraciones del capítulo	51
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
A.	Anexo 1	58
B.	Anexo 2	63
C.	Anexo 3	67
D.	Anexo 4	70
E.	Anexo 5	72

F. Anexo 6	75
G. Anexo 7	78
H. Anexo 8	81

Índice de cuadros

<u>Cuadro</u>		<u>Página</u>
2-1.	Notación utilizada para AUVs.	19
2-2.	Datos para el Minesniper MkII.	25
2-3.	Actuadores y variables de control.	28
3-1.	Valores del regulador.	48
G-1.	Actuadores y variables de control	78

Índice de figuras

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1-1.	Ilustración del AUV Hugin.	6
1-2.	Imagen del AUV R-OneAUV.	6
1-3.	Torpedo autopulsado diseñado en 1868 por Whithead.	8
1-4.	Esquema general.	10
1-5.	Elementos de Hardware.	11
1-6.	Método de modelado a partir de la geometría del <i>AUV</i>	13
1-7.	Esquemas de control.	14
2-1.	Objetivos del modelado.	17
2-2.	Sistemas de coordenadas con la definición de ángulos y velocidades.	18
2-3.	Curva de capacidad del propulsor.	29
2-4.	Identificación del modelo lateral.	39
2-5.	Relacion Empuje(N) - Velocidad(u).	41
2-6.	Identificación del modelo de profundidad.	42
3-1.	Esquema básico del lazo del actuador.	45
3-2.	Esquema de los actuadores del CIDNAV.	46
3-3.	Esquema de control los actuadores del CIDNAV	46
3-4.	Esquema de control de profundidad.	47
3-5.	Resultados del ajuste del lazo externo.	49
3-6.	Esquema de control de rumbo.	49

3-7. Ajuste del lazo de rumbo.	50
3-8. Ajuste del lazo de rumbo.	50
C-1. Geometría general de un AUV	67
F-1. curva de capacidad del propulsor	75