UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales

**Dinámica y Control para la Locomoción Estable de
Robots con Patas en Entornos Subacuáticos**

Autor

Gerardo Alejandro Portilla Tuesta

Director

Roque Saltarén Pazmiño

Tesis presentada para el Título de

Doctor en Automática y Robótica

2020

Tribunal nombrado por el Mgfc. Y Excemo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la tesis en el año 2020, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

VOCAL

VOCAL

VOCAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

A Rocío, por su apoyo constante

A mis padres, hermanos y a toda mi familia

A Perú y a mi tierra, Chachapoyas, que me vio nacer

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a la Universidad Politécnica de Madrid y al Centro de Automática y robótica por permitirme realizar mi doctorado y a los profesores de dicha institución por su apoyo y colaboración en la presentación de esta tesis.

En segundo lugar, me gustaría también reconocer al Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información “Leonardo Torres Quevedo” (ITEFI) por su ayuda para la realización de los experimentos de locomoción subacuática y especialmente al Prof. Francisco Montero, de quien he aprendido que la calidad humana de un compañero es tan importante como su calidad profesional. A él quiero darle las gracias encarecidamente por sus consejos, por transmitirme su afán de superación y por enseñarme que, aunque el camino sea difícil, la ciencia es una verdad por la cual hay que luchar.

Finalmente, no puedo terminar sin recordar a mi esposa Rocío, por su constante amor y paciencia; a mi cuñada Paloma, que también ha estado ahí para cuando la necesité; a mis padres, hermanos y familia, que aunque estén lejos siempre han estado presentes durante mi trabajo; a mis amigos y compañeros del doctorado, con los que he podido compartir esta experiencia y, cómo no, a mi tierra Perú, y a mi pueblo, Chachapoyas, con sus montañas, el olor a tierra mojada en sus días de lluvia y el sabor de su café recién tostado, que siempre me han acompañado durante esta travesía.

Madrid, 2020

*“Soy América Latina
Un pueblo sin piernas pero que camina”*

Resumen

La robótica subacuática ha ido evolucionando en los últimos años con el objetivo de explorar los incontables recursos, mineros, orgánicos y de exploración que posee el océano y que pueden ofrecer desde alternativas energéticas hasta aportaciones en medicina. En concreto, los últimos robots con patas submarinos nacieron con el fin de lograr una mayor estabilidad en el fondo acuático, pero los desarrollos más recientes se han limitado a una locomoción estática. Por ello, la presente tesis se propone contribuir en el desarrollo de la locomoción de robots con patas subacuáticas hacia el avance del caminado dinámico. Para esto se construyó un robot bípedo planar subacuático de actuación hidráulica junto a un sensor mecánico para medir la velocidad del fluido relativa al robot. Se determinaron la cinemática inversa y la dinámica que describe al robot, y se corroboraron los modelos mediante simulaciones computacionales. Además, se propusieron tres estrategias de control para una locomoción estable y dinámica. La primera se basa en un nuevo modelo, que es el *punto de momento cero subacuático* que mediante un control predictivo permite generar la trayectoria del centro de masa con las aceleraciones correctas para que el caminado sea estable y compense los momentos generados por las fuerzas dinámicas del robot. La segunda estrategia de control propuesta es la de control de posición con compensación dinámica, que permite controlar los actuadores a pesar de los cambios de carga dinámica que existen en el proceso de caminado. El tercer modelo se basa en un modelo que llamamos *punto de momento cero subacuático auxiliar* y que permite al robot recuperar el balance cuando se genera una perturbación externa del fluido, haciendo que el robot reaccione y busque una posición estable. Finalmente, para comprobar la teoría propuesta, el robot bípedo planar fue experimentado en una piscina de 4.5 metros de profundidad, obteniendo un caminado estable y logrando que el robot reaccione ante perturbaciones externas del fluido, retroceda y recupere el balance.

Abstract

The great resources, mining, organic and exploration, that are offered by the ocean are immense, from energy to medicine solutions. For this reason, underwater robotics has been developed with the aim of exploring this environment. Its development has seen from underwater robots up to underwater legged robots. They were born with the need to have greater stability in the underwater bottom; however their static locomotion developments are still limited. For this reason, in this thesis the locomotion development of the legged underwater robots and the dynamic walking are proposed. In order to do that, the underwater planar bipedal robot with the hydraulic actuation was built. Moreover, a mechanical sensor to measure the velocity of the fluid relative of the robot. The inverse kinematics and dynamics that describe the robot were determined, and these models were corroborated by computer simulations. Three control strategies for a stable and dynamic locomotion were proposed. The first based on a new model that is the underwater zero moment point. A predictive control of this model allows to generate the center of mass path with the correct accelerations. In this way, the walking is stable and are compensated the generated moments by the dynamic forces of the robot. The second control strategy is the position control with dynamic compensation. It allows the actuators to be controlled despite the dynamic load changes that exist in the walking process. The third proposed model is based on a model that is called underwater zero moment point auxiliary. It is a model that allows the robot to recover the balance when an external disturbance of the fluid is generated. It is caused the robot to react and look for a stable position. Finally, to verify the proposed theory, the planar bipedal robot was experimented in a pool of 4.5 meters deep. This experiment has obtained a stable walk and reaction of the robot to the external fluid disturbances. It caused the robot to back off and recover the balance.

Índice general

Índice figuras	10
Lista de tablas.....	14
1. CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	15
1. Motivación.....	15
2. Objetivos	16
3. Contribución	18
• Artículos científicos.....	19
• Congresos internacionales.....	20
• Patentes.....	20
4. Contenido.....	21
2. CAPÍTULO 2	
ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1. Robots subacuáticos.....	22
2.1.1 Vehículo Operado Remotamente (ROV)	23
2.1.2 Vehículos Submarinos Autónomos (AUV).....	25
2.1.3 Vehículo Subacuático con Sistema Manipulación (UVMS)	26
2.2 Robots con patas subacuáticos.....	27
2.2.1 Robots hexápodos subacuáticos.....	27
2.2.1 Robots cuadrúpedos subacuáticos.....	28
2.3 Locomoción de robots con patas.....	30
2.3.1 Caminado estático.....	30
2.3.2 Caminado dinámico.....	31
2.3.3 Trote y Salto	31
2.4 Conclusión.....	32
3. CAPÍTULO 3	
SENSOR DE VELOCIDAD RELATIVA SUBACUÁTICO.....	33
3.1. Diseño y construcción.....	33
3.2. Análisis cinemático.....	37
3.2.1. Cálculo de la cinemática inversa.....	38
3.2.2. Cálculo de la Matriz Jacobiana.....	38
3.3 Análisis dinámico.....	40
3.3.1. Fuerzas resultantes debido a la flotabilidad.....	41
3.3.2. Matriz de fuerzas y torque de cada brazo.....	41
3.3.3. Plataforma del mecanismo paralelo.....	43
3.3.4. Cilindro del actuador lineal i.....	43

3.3.5. Vástago del actuador lineal i.....	43
3.3.6. Actuador rotacional.....	44
3.3.7. Velocidades y aceleraciones angulares.....	44
3.3.8. Matriz Jacobiana de cada brazo.....	45
3.3.9. Torque generado por las fuerzas del fluido en la esfera.....	47
3.3.10. Velocidad y dirección del fluido.....	47
3.4 Algoritmo y simulación.....	47
3.5 Desarrollo de software.....	52
3.6 Experimentación.....	54
3.6.1. Primer experimento.....	56
3.6.2. Segundo experimento.....	58
3.6.3. Tercer experimento.....	60
3.7 Conclusión.....	63
 4. CAPÍTULO 4	
ROBOT BÍPEDO PLANAR SUBACUÁTICO.....	64
4.1 Diseño y construcción.....	64
4.2 Cálculo de constantes hidrodinámicas.....	71
4.2.1. Masa añadida.....	71
4.2.2. Coeficientes de amortiguamiento.....	75
4.3 Análisis cinemático.....	77
4.4 Análisis dinámico.....	79
4.5 Simulación.....	84
4.6 Conclusión.....	88
 5. CAPÍTULO 5	
CONTROL PARA LA LOCOMOCIÓN ESTABLE.....	89
5.1 Punto de momento cero subacuático.....	89
5.2 Control Predictivo.....	92
5.3 Control de Posición.....	94
5.4 Control para recuperar el balance.....	96
5.5 Simulación.....	97
5.6 Conclusión.....	104
 6. CAPÍTULO 6	
DESARROLLO DE SOFTWARE.....	105
6.1 Implementación del punto de momento cero subacuático.....	105
6.2 Implementación del control de posición.....	108
6.3 Conclusión.....	110

7. CAPÍTULO 7

EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.....111

7.1 Descripción del experimento.....111

7.2 Caminado dinámico.....113

7.3 Estabilización ante perturbaciones subacuáticas.....120

7.4 Discusión.....125

8. CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES.....128

BIBLIOGRAFÍA129

Lista de figuras

Figura 2.1. ROV de clase de observación.....	24
Figura 2.2. ROV de tamaño medio (MSROV).....	24
Figura 2.3. ROV de trabajo (MSROV).....	25
Figura 2.4. AUV desarrollado para propósitos de investigación.....	26
Figura 2.5. Vehículo Subacuático con Sistema Manipulación.....	26
Figura 2.6. Robot hexápodo subacuático CR200.....	28
Figura 2.7. Robot hexápodo subacuático CALEB 10.....	28
Figura 2.8. Robot cuadrúpedo DiverBOT.....	29
Figura 2.9. Robot cuadrúpedo SILVER.....	29
Figura 2.9. Estabilidad para el caminado estático del robot SILO.....	30
Figura 2.10. Péndulo invertido 2D: el modelo más simple para el caminado dinámico.....	31
Figura 2.11. Modelo SLIP para el robot SILVER.....	31
Figura 2.12. Modos de locomoción de los robots con patas subacuáticos.....	32
Figura 3.1. Sensor mecánico de velocidad relativa, tiene un mecanismo paralelo con tres brazos, 2 UPE (universal-prismática -esférica) y 1 UR (universal prismática). A este mecanismo se encuentra adjunto una esfera.....	34
Figura 3.2. Brazos del mecanismo paralelo del sensor, a) unión UPE, b) unión UR.....	34
Figura 3.3. Movimiento esférico del sensor.....	35
Figura 3.4 Posición de las IMUs en el sensor mecánico.....	35
Figura 3.5 Sensor mecánico construido.....	36
Figura 3.6 Detalle de los brazos a) unión UPE, b) unión UR.....	36
Figura 3.7 Prueba mecánica del sensor, se realiza movimientos circulares en los ejes a) Y, b) X, c) Z.....	37
Figure 3.8. Diagrama simplificado del mecanismo paralelo.....	37
Figure 3.9 Espacio de trabajo (superficie roja) y singularidades (superficie amarilla) del mecanismo paralelo.....	40
Figura 3.10. Modelo simplificado de la conexión entre el resorte y la unión UR. Esta conexión permite la transformación de la fuerza lineal del resorte en torque n el eje Z.....	42
Figura 3.11. Coeficiente de arrastre (CD) de una esfera versus el número de Reynolds (Re). Podemos ver que el coeficiente de fuerza de arrastre es constante empezando de 103 Re; con un valor aproximado de 0.47.....	48
Figura 3.12. Algoritmo para calcular la velocidad y dirección del fluido con el mecanismo paralelo.....	49
Figure 3.13. Método de simulación para la prueba del algoritmo.....	50
Figure 3.14. Resultados de la simulación, la línea naranja representa la velocidad del fluido simulada y la línea azul la velocidad del fluido calculada con el algoritmo.....	51
Figure 3.15. Determinante de la Jacobiana, se observa que el valor empieza a decaer, hasta ser menor que cero, indicándonos que el mecanismo ha pasado por una singularidad.....	51
Figure 3.16. Lectura de la IMU mediante el puerto serie.....	52
Figure 3.17. Lectura de los ángulos de y aceleraciones obtenidas por la IMU.....	52

Figure 3.18. Cálculo de la cinemática inversa, la matriz Jacobiana y cálculo de la dinámica inversa.....	53
Figure 3.19. Cálculo de las velocidades y dirección del fluido mediante la ecuación de la fuerza de arrastre.....	53
Figura.3.20. Modelo del sistema de experimentación del sensor mecánico.....	54
Figura.3.21. Tanque de agua usado para la demostración experimental del sensor mecánico.....	55
Figura 3.22. Modelo de adquisición de datos del encoder lineal y el sensor mecánico.....	55
Figura 3.23. Arreglo en el eje X del sensor mecánico para el primer experimento.....	56
Figura 3.24. Movimiento oscilatorio del sensor.....	57
Figura 3.25. Resultados de la medida de la velocidad del fluido en dirección del eje X.....	57
Figura 3.26. Error absoluto de la medida del sensor respecto al encoder con una media de 0.008 m/s.....	58
Figura 3.27. Arreglo en el eje Y del sensor mecánico para el primer experimento.....	58
Figura 3.28. Secuencia fotográfica del segundo experimento, se puede apreciar el movimiento oscilatorio de derecha a izquierdo.....	59
Figura 3.29. Resultados de la medida en el eje Y.....	59
Figura 3.30. Error absoluto de la media del censo con respecto a la medida con el encoder.....	60
Figura 3.31. Arreglo del sensor para el tercer experimento en una base de 30° de inclinación.....	60
Figura 3.32. Secuencia fotográfica del tercer experimento. Se puede apreciar el movimiento oscilatorio del sensor.....	61
Figura 3.33. Resultados de la medida de velocidad a lo largo del eje X.....	61
Figura 3.34. Error absoluto del sensor con respecto al encoder.....	62
Figura 3.35. Resultados de la medida de velocidad a lo largo del eje Z.....	62
Figura 3.36. Error absoluto del sensor mecánico respecto al encoder.....	62
Figura 4.1. Robot bípedo planar.....	65
Figura 4.2. Sensores y actuadores del robot bípedo.....	66
Figura 4.3 Unión de la pata a la base del robot.....	66
Figura 4.4. Mecanismo deslizante	67
Figura 4.5. Movimiento de la pierna sentido horario.....	67
Figura 4.6. Movimiento de la pierna sentido antihorario.....	68
Figura 4.7. Proceso de construcción del robot bípedo.....	68
Figura 4.8. Flujo de control del robot.....	69
Figura 4.9. a) sensores del robot, b) Hardware de control.....	69
Figura 4.10. Sensor flexible en la pierna del robot a) sensor no pandeado b) sensor pandeado.....	70
Figura 4.11. Conexión de mangueras hidráulicas en el robot.....	70
Figura 4.12. Robot bípedo planar completamente construido.....	71
Figura 4.13. Modelo experimental de masa añadida.....	72
Figura 4.14. Experimento de masa añadida, a) experimento en el eje X, b) experimento en el eje Z.....	73
Figura 4.15. Resultado oscilatorio de caída libre.....	74
Figura 4.16. Coeficiente de masa añadida a lo largo del eje X.....	74
Figura 4.17. Coeficiente de masa añadida a lo largo del eje Z.....	75
Figura 4.18. Cálculo de CFD, a) fluido en el eje X, b) fluido en el eje Z.....	76
Figura 4.19. Resultados de la fuerza hidrodinámica en el eje X.....	76
Figura 4.20. Resultados de la fuerza hidrodinámica en el eje Z.....	77

Figura 4.21. Diagrama de cuerpo libre para la cinemática inversa.....	78
Figura 4.22. Diagrama de cuerpo libre para el cálculo de la dinámico.....	79
Figura 4.23. Diagrama de cuerpo libre para calcular las fuerzas de reacción.....	82
Figura 4.24. Diagrama de flujo para la comprobación de los modelos.....	84
Figura 4.25. Proceso de simulación de un paso.....	85
Figura 4.26. Posiciones de los actuadores.....	85
Figura 4.27. Fuerzas y torques de los actuadores.....	86
Figura 4.28. Fuerzas de reacción de la pierna 1.....	87
Figura 4.29. Fuerzas de reacción de la pierna 2.....	87
Figura.5.1. Péndulo invertido subacúatico.....	90
Figure 5.2 Control Predictivo (MPC).....	92
Figura 5.3 a) salida del controlador b) referencia del Uzmp.....	93
Figura 5.4. Resultados de la posición, velocidad y aceleración del centro de masa.....	93
Figura 5.5. Movimiento del centro de masa.....	94
Figura 5.6. Estrategia de control de posición de los actuadores.....	95
Figura 5.7. Desplazamiento del Uzmp.....	96
Figura 5.8 Estrategia de control para la recuperación del balance.....	97
Figura 5.9 Esquema en Matlab/simulink, para la simulación.....	98
Figura 5.10 Secuencia fotográfica del proceso de simulación de caminado.....	98
Figura 5.11 Desplazamiento del centro de masa.....	99
Figura 5.12 Velocidad y aceleración del centro de masa.....	99
Figura 5.13 Retrato de fase.....	100
Figura 5.14 Posiciones de los actuadores.....	100
Figura 5.15 Fuerzas y torques de los actuadores.....	101
Figura 5.16 Fuerzas de amortiguamiento del fluido.....	102
Figura 5.17 Experimento de reacción.....	102
Figura 5.18 Trayectoria generada del centro de masa.....	103
Figura 5.19 Posición de los actuadores.....	103
Figura 6.1 Inicio de las contantes y las matrices del Uzmp.....	106
Figura 6.2 Control predictivo.....	106
Figura 6.3 Cálculo de la cinemática inversa.....	107
Figura 6.4 Cálculo de la dinámica inversa.....	107
Figura 6.5 Lectura de los sensores.....	108
Figura 6.6 Lectura de la Crio.....	108
Figura 6.6 Lectura de las variables globales.....	109
Figura 6.7 Control de compensación dinámica.....	109
Figura 7.1 Laboratorio de experimentación, 1) sistema de control del robot, 2) manguera hidráulica,3) robot bípedo planar, 4) Piscina.....	112
Figura.7.2. Robot bípedo planar sumergido a 4.5 metros de profundidad.....	112
Figura.7.3. Serie fotográfica del proceso de caminado dinámico.....	114
Figura.7.4. Desplazamiento del centro de masa.....	114
Figura.7.5. Desplazamientos de los actuadores de la pierna 1.....	115
Figura.7.6. Desplazamientos de los actuadores de la pierna 2.....	116
Figura.7.7. Diagrama de fase de la del actuador q2.....	117

Figura.7.8. Diagrama de fase del actuador q_1	117
Figura.7.9. Torques y fuerzas de los actuadores de la pierna 1.....	118
Figura.7.10. Torques y fuerzas de los actuadores de la pierna 2.....	119
Figura.7.11. Velocidades relativas obtenidas por el sensor mecánico.....	120
Figura.7.12. Serie fotográfica del proceso de reacción para recuperar el balance.....	121
Figura.7.13. Velocidades relativas obtenidas por el sensor mecánico.....	122
Figura.7.14. Cálculo del Punto de momento cero auxiliar (U_{zmp_aux}).....	123
Figura.7.15. Posición del centro de masa.....	123
Figura.7.16. Posiciones de los actuadores de la pierna 1.....	124
Figura.7.17. Posiciones de los actuadores de la pierna 2.....	125

Lista de tablas

Tabla 3. 1. Características físicas del sensor mecánico	50
Tabla 4.1. Masa añadida de las piernas y eje.....	75
Tabla 7.1 Valores de las constantes para la experimentación.....	113

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de las últimas décadas diversos modelos de robots subacuáticos han sido desarrollados para la exploración y trabajo en ambientes tales como el océano, lagos, etc. Los más importantes para el desarrollo de esta tesis son los robots con patas subacuáticos, concebidos para llevar a cabo una exploración submarina con mayor estabilidad mediante el uso de las patas. Esta nueva generación de robots abre nuevas puertas a la investigación y plantea nuevos retos para la locomoción de robots en entornos subacuáticos. Por ello, en este trabajo se plantean nuevas estrategias de locomoción para esta clase de robots, desarrollando la dinámica y control para un caminado dinámico con capacidad de reaccionar ante perturbaciones subacuáticas. Dicha motivación se describirá en este primer capítulo, junto a los objetivos principales de este estudio, sus contribuciones y aportes a la comunidad científica, así como la estructura del presente documento.

1.1 Motivación

Los océanos cubren el 71 % de la superficie de la tierra. Se estima que el volumen de agua de los océanos es de 1.37 billones de kilómetros cúbicos y el 75 % de los océanos tienen una profundidad de 3000 y 6000 m (Eldredge, 2002). Las grandes profundidades y la expansión de este ambiente implican muchos recursos y biodiversidad por descubrir que probablemente

vayan a ser en un futuro no muy lejano fuente de solución para muchos de los problemas de la humanidad. Sin embargo, las dificultades físicas como la presión, la densidad y temperatura, son un reto científico para el desarrollo de tecnologías que nos permitan explorarlas y sacar beneficio de este entorno.

Recursos como las algas tienen muchas propiedades interesantes para la salud, la energía o la alimentación tal y como muestran diversos estudios. Se trata de una biomasa enormemente abundante y, por tanto, renovable y sostenible, cuyos altos niveles de azúcar se pueden utilizar para la producción de bioetanol y productos químicos (K. Lee, E. Lee, 2017). Sus amplias funcionalidades biológicas incluyen antioxidantes, antiinflamatorios, anticancerígenos, antimicrobianos, etc. (Fernando, Yeon, 2016).

Pero además los océanos contienen fuentes de energía (petróleo y gas) y materias primas (arena y grava, fosforita, corales y otros carbonatos biogénicos, minerales de metales pesados). En términos económicos, los hidrocarburos son el recurso más importante, mientras que, en la actualidad, las materias primas solo poseen importancia regional. En lo que respecta a otros minerales de las profundidades marinas, todavía no se ha logrado obtener beneficio de ellos, si bien es evidente su interés científico y potencial valía (Seibold, Eugen, y Wolfgang Berger, 2017).

Para el aprovechamiento de estos últimos materiales se requieren tecnologías como la robótica, por su autonomía y teleoperación. Así, robots o vehículos submarinos no tripulados (UUV) y vehículos submarinos operados a distancia (ROV) han surgido para ayudarnos a entender el ambiente marino y otras características, proteger los recursos del océano y usarlos eficientemente para el bienestar humano (Siciliano, Bruno y Oussama Khatib, 2016).

Sin embargo, ante las dificultades de estabilidad de este tipo de robots, debido al constante movimiento de los entornos submarinos, ha surgido una nueva propuesta de robots subacuáticos con patas que abren una nueva línea de investigación para el control de robots. Estos plantean nuevos problemas de dinámica para la locomoción que, una vez resueltos, permitirían a estos equipos moverse de una manera eficiente y rápida en las profundidades del océano, mejorando la protección, explotación y sostenibilidad de los recursos que este nos ofrece.

1.2 Objetivos

Para alcanzar una locomoción estable para robots con patas en entornos subacuáticos es necesario comprender la dinámica y proponer nuevas estrategias de control que permitan un caminado dinámico y la reacción del robot ante perturbaciones subacuáticas. Para lograr este propósito en la presente tesis se plantean los siguientes objetivos:

- *Diseño y construcción de un sensor mecánico de velocidad relativa subacuático.* Las fuerzas dinámicas producidas por el movimiento en un entorno subacuático son directamente proporcionales a la velocidad relativa de este cuerpo con el fluido. Por esta razón es importante el desarrollo de un sensor que mida a tiempo real esta velocidad, el cual será fundamental para la estrategia de control.
- *Diseño y construcción de un robot bípedo planar subacuático.* Los robots bípedos planares, han sido desarrollados en la historia de la robótica para el estudio de locomoción de robots con patas, por su simplicidad y la posibilidad de realizar experimentos repetitivos para la comprobación de los modelos. De este modo para la realización de esta tesis se desarrollará un robot bípedo planar con la capacidad de operar en entornos subacuáticos para su experimentación.
- *Estudio de la dinámica y cinemática del robot con patas en entornos subacuáticos.* Para el desarrollo de estrategias de control es necesario el conocimiento de la dinámica y cinemática del robot, obteniendo así soluciones analíticas y validadas con simulaciones numéricas, de tal manera que los modelos analíticos obtenidos puedan ser usados en los algoritmos de control del robot.
- *Desarrollo de estrategias de control para la locomoción estable.* Se desarrollarán tres estrategias de control con el objetivo de obtener una locomoción estable. La primera un control para el caminado dinámico, la segunda un control de posición para los actuadores, y finalmente un control que le permita reaccionar y mantener su estabilidad ante perturbaciones externas subacuáticas.
- *Desarrollo del software para la implementación de los sistemas de control.* Se desarrollará un software del robot, implementando las estrategias de control y los estudios de dinámica y cinemática para su locomoción, de tal manera que nos permita desarrollar los experimentos y adquirir datos.
- *Experimentación del robot en un entorno subacuático para la validación de los modelos propuestos.* Se realizarán experimentos de caminado dinámico en un entorno subacuático y también experimentos con perturbaciones del fluido para observar que el robot es capaz de reaccionar y mantenerse estable. De este modo los resultados experimentales nos permitirán validar los conceptos desarrollados en esta investigación.

1.3 Contribución

A lo largo de este trabajo varios temas han sido citados en el campo de la robótica subacuática. Las contribuciones más importantes de este trabajo son las siguientes:

- *Desarrollo del modelo dinámico y algoritmos para la medida de la velocidad relativa subacuática mediante un mecanismo paralelo esférico.* Mediante el modelo dinámico propuesto en esta investigación, se ha podido desarrollar un algoritmo que permite determinar la velocidad relativa de un cuerpo con el fluido en el que se mueve en los tres ejes cartesianos.
- *Modelo dinámico para robots con patas en entornos submarinos.* Se desarrolla el modelo dinámico para los robots con patas en entornos submarinos, para su aplicación en forma generalizada, tomando en cuenta las fuerzas de reacción y los efectos hidrodinámicos producidos por el entorno.
- *Punto de Momento Cero Subacuático.* Para el desarrollo del control para el caminado dinámico se propone por primera vez en esta investigación el Punto de Momento Cero Subacuático, obtenido a partir del análisis de un péndulo invertido subacuático. Este modelo permitirá a los robots caminar en forma dinámica en entornos subacuáticos.
- *Punto de Momento Cero Subacuático Auxiliar.* Con el objetivo de desarrollar una estrategia de control que le permita al robot reaccionar ante perturbaciones externas, en esta investigación se propone el modelo del Punto de Momento Cero Auxiliar, el cual facilite al robot predecir el punto de estabilidad para reaccionar ante una fuerza externa producida por el fluido y generar la posición de sus patas.
- *Estrategia de control para robots con patas en entornos subacuáticos.* Se desarrolla una estrategia de control de posición de los actuadores para su ejecución en el entorno subacuático, haciendo uso de la dinámica y la realimentación del sensor de velocidad relativa subacuática propuesta en esta tesis.

Al momento de escribir este documento, las contribuciones de esta tesis han dado como resultado las siguientes publicaciones:

Artículos científicos

- Portilla, G., Saltarén, R., Espinosa, F. M. D., Barroso, A. R., Cely, J., & Yakrangi, O. (2019). *Dynamic Walking of a Legged Robot in Underwater Environments*. Sensors, 19(16), 3588.
- Portilla, G., Saltarén, R., Barroso, A. R., Cely, J., & Yakrangi, O. (2019). *A Sensor Based on a Spherical Parallel Mechanism for the Measurement of Fluid Velocity: Experimental Development*. IEEE Access, 7, 16145-16154.
- Saltarén, R., Portilla, G., Barroso, A., & Cely, J. (2018). *A sensor based on a spherical parallel mechanism for the measurement of fluid velocity: Physical modelling and computational analysis*. Sensors, 18(9), 2867.
- Cely, J. S., Saltaren, R., Portilla, G., Yakrangi, O., & Rodriguez-Barroso, A. (2019). *Experimental and Computational Methodology for the Determination of Hydrodynamic Coefficients Based on Free Decay Test: Application to Conception and Control of Underwater Robots*. Sensors, 19(17), 3631.
- Rodriguez-Barroso, A., Saltaren, R., Portilla, G., Cely, J., & Carpio, M. (2018). *Cable-driven parallel robot with reconfigurable end effector controlled with a compliant actuator*. Sensors, 18(9), 2765.
- Rodriguez-Barroso, A., Saltaren, R., Portilla, G. A., Cely, J. S., & Yakrangi, O. (2019). *Potential Energy Distribution of Redundant Cable-Driven Robot Applied to Compliant Grippers: Method and Computational Analysis*. Sensors, 19(15), 3403.
- Carpio Alemán, M. A., Saltaren, R., Rodriguez, A., Portilla, G., & Placencia, J. D. (2019). *Rotational Workspace Expansion of a Planar CDPR with a Circular End-Effector Mechanism Allowing Passive Reconfiguration*. Robotics, 8(3), 57.

Congresos internacionales

- Carpio, M. A., Placencia, J. C., Aller, J., Saltarén, R. J., Rodríguez, A., Portilla, G. A., & Cely, J. S. (2019, October). *Modeling and Oscillations Control of a Planar Parallel Robot Subsystem Activated by Cable*. In 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) (pp. 1-5). IEEE.
- Carpio, M. A., Astudillo, R. E., Aller, J. M., Saltarén, R. J., Rodríguez, A., Portilla, G. A., & Cely, J. S. (2019, October). *Cables Configuration Analysis for a planar CDPR, based on the Lowest Kinematic Energy for a Rotation Movement*. In 2019 IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) (pp. 1-6). IEEE.
- Carpio, M. A., Saltarén-Pasmino, R. J., Rodríguez, A., Portilla, G. A., Cely, J. S., González-Álvarez, N. X., & Castillo-Guerrero, J. M. (2018, November). *Collision and Tension Analysis of Cable-Driven Parallel Robot for Positioning and Orientation*. In 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) (pp. 1-6). IEEE.
- Barroso, A. R., Saltaren, R., Portilla, G., Cely, J. S., & Carpio, M. (2018, October). *Smooth Path Planner for Dynamic Simulators Based on Cable-Driven Parallel Robots*. In 2018 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) (pp. 145-150). IEEE.
- Tenesaca, J., Carpio, M., Saltaren, R., & Portilla, G. (2017, November). *Experimental determination of the nonlinear model for a proportional hydraulic valve*. In 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) (pp. 1-4). IEEE.

Patentes

- Saltaren Pazmiño, Cely Gutierrez, Rodriguez Barroso, Portilla Gerardo, Yakrangi, *SISTEMA SUBACUÁTICO PARA LABORES DE ACUICULTURA*. N.º: ES 2 729 816 A1, (2019).

1.4 Contenido

Este documento está dividido en 8 capítulos. En el segundo capítulo se presenta el estado del arte de esta tesis, donde se abordan los antecedentes de la robótica subacuática y, en especial, de los robots con patas subacuáticas. En el tercer capítulo se trata el desarrollo de un sensor mecánico para medir la velocidad relativa del robot respecto al fluido. En el cuarto capítulo se describe el diseño y construcción de un robot bípedo planar para la realización de los experimentos, como también los modelos dinámicos y cinemáticos. En el quinto capítulo se plantean las estrategias de control para la locomoción subacuática, se propone el punto de momento cero subacuático para el caminado dinámico, la estrategia de control de posición de los actuadores y el punto de momento cero auxiliar para el control ante perturbaciones externas. En el sexto capítulo se expone el desarrollo del software para la implementación de los modelos de control propuesto en el robot con patas. En el séptimo capítulo se detalla el proceso de experimentación para el caminado dinámico y el control de estabilidad ante perturbaciones externas y se muestran los resultados obtenidos en el entorno subacuático. Finalmente, en el octavo capítulo se articulan las conclusiones de esta investigación.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se presenta el estado del arte de la robótica subacuática, exponiendo el desarrollo de este campo hasta las más recientes tecnologías, los objetivos que persigue y las dificultades técnicas que aún se están estudiando. Se exponen también los desarrollos de robots con patas subacuáticos y el tipo de locomoción que estos usan. Mediante esta descripción de los antecedentes se pretende mostrar la contribución de esta tesis al desarrollo de la locomoción subacuática.

2.1 Robots subacuáticos

La robótica subacuática en los últimos años ha desarrollado un creciente interés en la investigación y la industria. Actualmente, el uso de sistemas robóticos submarinos tripulados para cumplir misiones como levantamiento de fondos marinos y tuberías, mantenimiento de cables, monitoreo de estructuras en alta mar o recolección y liberación de levantamientos biológicos es común. Sin embargo, el uso de estos vehículos tripulados implica un enorme coste y riesgo (Antonelli, 2014).

Los robots subacuáticos presentan diversas clasificaciones. Los ROVs (Vehículo Operado Remotamente) denotan un vehículo submarino físicamente vinculado, a través de un cable, a un operador que puede estar en un submarino o en un barco de superficie. El cable se encarga de dar potencia al vehículo y de cerrar el circuito de control tripulado. Por su parte, los AUVs (Vehículos Submarinos Autónomos), son completamente autónomos, por lo que dependen del sistema de energía a bordo y la inteligencia. Estos dos tipos de vehículos subacuáticos comparten algunos problemas de control. En el caso de misiones que requieren

interacción con el medio ambiente, el vehículo puede estar equipado con uno o más manipuladores mediante un sistema UVMS (Sistema subacuático de manipulación de vehículos).

2.1.1 Vehículo Operado Remotamente (ROV)

Los robots submarinos operados remotamente (ROV, por las siglas en inglés *Remotely Operated Vehicle*) están conectados a la superficie mediante un cordón umbilical (un conjunto de cables unidos) que permite el intercambio de datos y la alimentación de energía al robot. A través de una interfaz gráfica del ordenador situado en la superficie, el usuario define los comandos que el robot deberá ejecutar. A su vez el ROV envía las señales de sus sensores (presión, temperatura, imágenes) al ordenador en superficie, para que el usuario conozca el estado del robot y el ambiente que lo rodea. Actualmente a las instalaciones petroleras o de gas se les presta servicio mediante ROVs. Las exigencias del trabajo realizado en estructuras submarinas son altas, ya que requieren de inspección frecuente e intervención para realizar las operaciones de perforación, manipular válvulas, reparar o remplazar componentes submarinos y realizar una variedad de tareas requeridas para mantener el ritmo de producción y la calidad del producto. La tendencia en el uso de ROVs aumenta a medida que la producción de gas y petróleo en instalaciones cerca de la costa se traslade hacia aguas profundas (Moreno, 2014).

Cuando las tareas se realizan a grandes profundidades, las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre la superficie del cable son mayores. Esto hace que el vehículo sea menos manejable. Aunque los cables han aumentado su diámetro (debido a los mayores requerimientos de energía), el aumento de la superficie de incidencia de las fuerzas de arrastre es producto, en gran medida, de su extensa longitud. No obstante, se han presentado algunas soluciones como construir un Sistema de Manejo de Cable (TMS, por las siglas en inglés de *Tether Management System*) que se ancla en el fondo marino y soporta las fuerzas de arrastre del cable de mayor distancia (va desde la embarcación en la superficie al TMS) y, a la vez, permite que el ROV navegue con más facilidad.

Los ROVs, se pueden clasificar en tres clases. La primera clase es el ROV de observación (OCROV); estos vehículos van desde los micro-ROV más pequeños hasta el peso de un vehículo de 100 kg. Estos son generalmente más pequeños, alimentados por CC (Figura 2.1). Al ser de bajo costo, son utilizados como respaldo para buzos o como una sustitución de buzos para tareas generales de inspección de aguas poco profundas. Los vehículos en esta clasificación generalmente se limitan a clasificaciones de profundidad de menos de 300 m de agua, debido al peso de la potencia de componentes de entrega y alojamientos de presión de una atmósfera. Esto impone limitaciones sobre el tamaño del vehículo, es decir, se debe mantener la flotabilidad neutra para que el vehículo tenga la capacidad nadar (Sivcev, 2018).

Figura 2.1. ROVs de clase observación

La segunda clase, son los ROVs de tamaño medio (MSROV), que pesan desde 100 kg hasta 1000 kg. Estos son generalmente una versión de mayor profundidad (Figura 2.2) con suficientes componentes de suministro de energía de CA y alojamientos de presión capaces de alcanzar mayores profundidades con longitudes de cuerda más largas. En general, también se trata de vehículos totalmente eléctricos (que accionan motores primarios y controles de movimiento de la cámara) con cierta potencia hidráulica para la operación de manipuladores, y opciones de paquetes de herramientas pequeñas. La potencia eléctrica del vehículo se reduce a un voltaje manejable para el funcionamiento de los diversos componentes y puede ser CA o CC. Los vehículos de esta clasificación a veces se denominan de "clase de trabajo ligero" para diferenciarlos completamente de los OCROV. Debido al peso de estos vehículos, a menudo se necesita un sistema de lanzamiento y recuperación (LARS), así como un sistema de gestión de sujeción (TMS) (Sivcev, 2018).

Figura 2.2. ROV de tamaño medio (MSROV)

La tercera clase son los ROVs de trabajo (WCROV); generalmente vehículos electromecánicos pesados que funcionan en circuitos de CA de alto voltaje (>3000 V) desde la superficie hasta el vehículo (Figura 2.3). La potencia entregada al vehículo generalmente se cambia inmediatamente a potencia mecánica (hidráulica) en el vehículo para la locomoción, así como todas las funciones de manipulación y herramientas.

Figura 2.3. ROV de trabajo (MSROV)

2.1.2 Vehículos Submarinos Autónomos (AUV)

Los vehículos submarinos autónomos (AUVs, por las siglas en inglés de *Autonomous Underwater Vehicle*) poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador (Figura 2.4). Además, contienen su propia fuente de energía generalmente basada en baterías recargables. Por lo general, no hay una línea de comunicación entre el vehículo y la superficie, ya que se suele programar con tareas y misiones predefinidas.

No obstante, cuando se requiere un intercambio de información con la superficie, la comunicación se puede realizar a través de dispositivos acústicos. Estos robots pueden resolver las limitaciones impuestas por los cables de los ROVs para algunas tareas. Los AUVs se utilizan actualmente para tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración debajo del hielo (Christ, 2013). Los datos que recopila el vehículo se almacenan en su memoria interna para luego ser analizados. Por otro lado, también se han utilizado para operaciones militares y se están desarrollando aplicaciones más elaboradas como lo son vigilancia submarina.

Figura 2.4. AUVs desarrollado para propósitos de investigación

2.1.3 Vehículo Subacuático con Sistema de Manipulación (UVMS)

La mayoría de los manipuladores subacuáticos existentes utilizados en UUV son antropomórficos, es decir, están diseñados para parecerse a un brazo humano (Figura 2.5). Estos manipuladores están compuestos por una secuencia de cuerpos rígidos (enlaces) interconectados por medio de uniones giratorias con un desplazamiento angular adecuado entre ellos, mientras que las pinzas u otras herramientas intercambiables están conectadas al efector final. Para la observación de su entorno, generalmente van acompañados de equipos adicionales que comprenden una o más cámaras y focos montados en el vehículo o en el mismo manipulador (Christ, 2013).

Figura 2.5. Vehículo Subacuático con Sistema Manipulación

2.2 Robots con patas subacuáticos

Las dificultades de estabilización que tienen los ROVs en entornos subacuáticos debido al movimiento constante del fluido (Ariya, 2016), (Guo, Gu y Zheng, 2019) han traído consigo el desarrollo de robots con patas subacuáticos, ya que en los entornos terrestres han demostrado tener grandes habilidades para la locomoción, así como buena estabilidad ante perturbaciones externas y terrenos de geometría compleja (Liu, 2016), (Seo, 2014), (C. Tang, 2017).

Los tipos de robots con patas subacuáticos, según la literatura desarrollada hasta ahora, se pueden clasificar según su número de extremidades en hexápodos, con 6 patas, o cuadrúpedos si tienen 4. Según esto a continuación describiremos los robots con patas desarrollados hasta el momento.

2.2.1 Robots hexápodos subacuáticos

Los robots hexápodos son máquinas con seis patas unidas a un solo cuerpo. Las patas se controlan con cierto grado de autonomía para que el robot pueda moverse dentro de su entorno y realizar las tareas previstas. Esta clase de robots pueden ser adecuados para aplicaciones terrestres y espaciales y pueden incluir características tales como movimiento omnidireccional, geometría variable, buena estabilidad, acceso a terreno diverso y locomoción tolerante a fallas (Tedeschi, 2014).

Uno de los factores motivadores que a menudo se da para continuar el desarrollo de robots hexápodos es que pueden escalar obstáculos más grandes que un vehículo de ruedas del mismo tamaño equivalente. De hecho, el uso de ruedas o rastreadores limita el tamaño del obstáculo que se puede subir a la mitad del diámetro de las ruedas. Por el contrario, los robots con patas pueden superar obstáculos que son comparables con el tamaño de la pata de la máquina (Carbone, 2005). Los robots hexápodos también provocan un menor impacto en el terreno y tienen una mayor movilidad en entornos naturales. Así, se han utilizado en la exploración de ubicaciones remotas y espacios hostiles como los fondos marinos (Chavez, 2011).

Entre esta clase de robots encontramos el CR200, que fue construido conceptualmente basándose en el cangrejo (Jun y otros, 2013), (H. Jun y otros, 2012), (B. Kim, 2014). La misión principal de CR200 es la inspección de los naufragios o la exploración y estudio de la tomografía del fondo marino en entornos turbulentos y de alto caudal (Figura 2.6).

Este robot controla su posición y obtiene movilidad de las seis patas para su locomoción. En una zona de alta corriente submarina el CR200 alinea su rumbo a la dirección de la corriente y mantiene la parte delantera hacia abajo y la cola hacia arriba. Por lo tanto, la fuerza de elevación hacia abajo aumenta y el robot obtiene suficientes fuerzas de contacto entre los pies y el fondo marino para garantizar la estabilidad de la caída. La geometría del cuerpo y las piernas están optimizadas para mejorar las características hidrodinámicas sobre todo en altas velocidades del fluido. Basado en la postura estable, el CR200 puede obtener imágenes acústicas claras del sonar de escaneo de alta resolución, incluso en un entorno altamente turbio.

Figura 2.6. Robot hexápodo subacuático CR200

Otro robot de la misma clasificación encontramos a CALEB 10. Este modelo inspirado en los escarabajos (Figura 2.7) es un robot con patas que está en desarrollo para permitir múltiples movimientos al nadar y caminar en entornos subacuáticos (H. Lee y J. Lee, 2017), (Kim y Lee, 2017). A diferencia del anterior, este no usa impulsores para su navegación sino sus patas para nadar. Además, tiene una forma geométrica hidrodinámica que le permite disminuir la fuerza de arrastre en altas corrientes, dándole a este una mayor estabilidad.

Figura 2.7. Robot hexápodo subacuático CALEB 10

2.2.2 Robots cuadrúpedos subacuáticos

Los robots cuadrúpedos son máquinas con cuatro patas unidas a un cuerpo. Este tipo de robots ha demostrado un gran potencial para la locomoción en un entorno complejo. BigDog (Raibert y otros, 2008) y HyQ (Havoutis y otros, 2013) son algunos ejemplos de sistemas robóticos cuadrúpedos muy avanzados. Estos pueden moverse de forma estable en superficies irregulares con distintos modos de locomoción, caminado estático, dinámico,

trote y salto, a diferencia de los robots hexápodos que solo podían realizar el caminado estático. Algunos de los robots cuadrúpedos desarrollados para entornos subacuáticos son los siguientes:

DiverBot es un robot cuadrúpedo antropoide inspirado en los chimpancés (Figura 2.8) que presenta la capacidad de transformarse en dos diferentes configuraciones: un antropoide cuadrúpedo y en un vehículo ROV. Los brazos y las piernas son actuados hidráulicamente, mientras que los impulsores que usa para su navegación son eléctricos. Por su parte, su locomoción se basa en la estabilización estática del centro de masa. El robot tiene 24 grados de libertad y puede trabajar a cualquier profundidad y moverse sobre superficies marinas irregulares con pendientes y barrancos. Es robusto y ligero y se puede controlar fácilmente mediante gestos y movimientos naturales del operador remoto (Saltaren, 2018), (Ejarque, 2016).

Figura 2.8. Robot cuadrúpedo DiverBOT

El robot SILVER (Figura 2.9) tiene como objetivo aprovechar los contactos con el suelo para mejorar la capacidad de locomoción y exploración de los vehículos submarinos en zona bentónica. Se trata de un vehículo submarino de bastidor abierto que presenta cuatro subsistemas conceptuales principales: el estructural, la flotabilidad, la actuación y el electrónico (Picardi, 2018), (Calisti, 2015). La principal característica de este robot es su forma de locomoción basada en saltos, que propone un nuevo modelo simplificado llamado U-SLIP (Underwater Spring Loaded Inverted Pendulum). Este modelo físico le permite al robot controlar la posición en cada salto.

Figura 2.9. Robot cuadrúpedo SILVER

2.3 Locomoción de robots con patas

Existen diversos tipos de locomoción para los robots con patas, pero hasta la actualidad se pueden definir cuatro tipos: el caminado estático, el cual es usado por robots hexápodos; el caminado dinámico, mucho más rápido y usado tanto por robots cuadrúpedos como bípedos; el trote, basado en pequeñas estancias donde las patas no tocan el suelo y bastante rápido pero requiere de una buena estrategia de control y, finalmente, el salto, realizado incluso con robots de una sola pata, se fundamenta en el impulso de la pata para realizar la elevación del cuerpo.

2.3.1 Caminado estático

Un robot ideal es estáticamente estable si la proyección horizontal de su centro de gravedad (CG) se encuentra dentro del polígono de soporte. Se supone que el robot ideal tiene patas sin masa y que la dinámica del sistema está ausente. La primera generación de máquinas para caminar emuló este principio de locomoción siendo los primeros robots caminantes mecanismos enormes con extremidades pesadas y demasiado difíciles de controlar (Kumar y otros, 1989), (Parasuraman y otros, 2011). La adopción de pasos estáticamente estables podría simplificar su control, pero, sin embargo, durante el movimiento de las extremidades pesadas y el cuerpo, se encontraron algunos efectos inerciales y otros componentes dinámicos (fricción, elasticidad, etc.), lo que restringió los movimientos del robot a bajas velocidades. Por lo tanto, la adopción de la estabilidad estática facilitó el control de movimiento, pero sacrificó la capacidad de aumentar la velocidad. El método de proyección del Centro de gravedad (CG) afirma que el vehículo es estáticamente estable si la proyección horizontal de su CG se encuentra dentro del polígono de soporte (Figura 2.10) (Santos y otros, 2007).

Figura 2.9. Estabilidad para el caminado estático del robot SILO

2.3.2 Caminado dinámico

El caminado dinámico se produce cuando existen periodos donde la proyección del centro de masa deja el polígono de soporte. Esto se logra generando el equilibrio entre las fuerzas inerciales y las fuerzas estáticas mediante uno de los métodos más conocidos: el punto de momento cero o “*zero moment point (ZMP)*” (Kajita, 2014). Este define el punto con respecto al cual la fuerza de reacción dinámica producida por el contacto del pie con el suelo no produce ningún momento de inercia en dirección horizontal, es decir, el punto donde la suma de la totalidad de las fuerzas horizontales, contabilizando la inercia y la gravedad sea igual a cero (Jing, 2013). El concepto asume que el área de contacto con el suelo es plana y que ejerce suficiente fricción para evitar que los pies se deslicen (Ferreira y otros, 2009).

Figura 2.10. Péndulo invertido 2D: el modelo más simple para el caminado dinámico

2.3.3 Trote y salto

El trote y salto se describen como pasos de “rebote” contemplados por el modelo de péndulo invertido con resorte (SLIP) (Seo y otros, 2014) (Xue y otros, 2017). Estos pasos muestran la fuerza vertical máxima en la posición media cuando el centro de masa está en su punto más bajo y pueden incluir períodos aéreos entre los contactos de las piernas. Debido a que los modos de andar de SLIP pueden lograrse con resortes en la pierna, esto proporciona un mecanismo para reducir el costo total de energía, almacenando parte de la energía elástica en la fase de absorción de la postura temprana y devolviéndola en la fase generativa de la postura tardía (Haitao y otros, 2017). En la figura 2.11 se observa el modelo SLIP desarrollado para el control del robot SILVER.

Figura 2.11. Modelo SLIP para el robot SILVER

Finalmente, en la figura 2.12 se ha agrupado los robots con patas subacuáticos ya mencionados según su modo de locomoción. Se puede apreciar que la mayoría de ellos tienen un caminado estático y solo uno, el robot SILVER, puede desarrollar la locomoción del salto. Ante la inexistencia de antecedentes de caminado dinámico y trote, por lo que en esta tesis pretende contribuir en este ámbito de la locomoción de robots con patas en entornos submarinos.

Figura 2.12. Modos de locomoción de los robots con patas subacuáticos

2.4 Conclusión

El objetivo de este capítulo es demostrar la importancia de la presente investigación y la relevancia de sus aportes al campo de la investigación académica en robótica subacuática. Como se ha visto, esta última ha evolucionado para paliar las distintas necesidades de la sociedad, desarrollando desde robots de navegación más tradicionales hasta robots con patas más avanzados que buscan lograr una mayor estabilidad. Se han descrito muchas propuestas de robots con patas subacuáticos, pero la mayoría de ellos se han desarrollado con la intención de un caminado estático. Por ello, aún queda mucho por investigar en el terreno de las estrategias de locomoción para conseguir implementar modelos más avanzados como el caminado dinámico y trote. Sirva esta investigación para aportar conocimiento al desarrollo de la locomoción subacuática y proponer modelos matemáticos y estrategias de control.

Capítulo 3

Sensor de velocidad relativa subacuático

Debido a las fuerzas hidrodinámicas producidas por el fluido en un cuerpo sumergido, el cual es proporcional a la velocidad relativa con el fluido, surge la necesidad de desarrollar un sensor que mida esta velocidad, la cual será de gran importancia para el sistema de control del robot subacuático. Basándose en la patente de invención ES2525394B2 (Enarque y otros, 2014), en este capítulo se diseña y construye un sensor mecánico, capaz de medir las velocidades relativas en entornos subacuáticos. Además, se desarrollan los modelos cinemáticos y dinámicos para finalmente proponer el algoritmo de cálculo de velocidad relativa. Estos modelos son validados mediante simulación por ordenador y posteriormente mediante diversas pruebas experimentales.

1. Diseño y construcción

El sensor se basa en un mecanismo paralelo (Taghirad, 2013) de tres grados de libertad angulares, como se observa en la Figura 3.1. Esta consta de 3 brazos paralelos, de los cuales 2 son UPE (universal-prismática-esférica) y uno UR (universal-rotacional). Las uniones prismáticas y la unión rotacional cuentan con resortes que aportan rigidez a la estructura mecánica. Este mecanismo lleva anclado una esfera, la cual en su interior cuenta con una IMU (Unidad de medida inercial) que mide los ángulos de inclinación de la plataforma paralela. Cuando el fluido colisiona con la esfera, esta deforma la estructura paralela. Mediante la IMU conocemos los ángulos de inclinación del centro de movimiento esférico del sensor y mediante cinemática inversa se calcula el desplazamiento de los resortes en cada brazo. Finalmente, con el cálculo de dinámica inversa del mecanismo se estima el valor de

la fuerza aplicada en la esfera y, a partir de dicho valor, se determina la velocidad del fluido mediante la ecuación de la fuerza de arrastre.

Figura 3.1. Sensor mecánico de velocidad relativa, tiene un mecanismo paralelo con tres brazos, 2 UPE (universal-prismática-esférica) y 1 UR (universal prismática). A este mecanismo se encuentra adjunto una esfera.

En la figura 3.2 se muestra el ensamblaje de cada brazo. El modelo a es la unión UPE, donde la unión universal se conecta con la saliente del cilindro, dándole a este un agrado de libertad más y obteniendo una unión esférica. A continuación, el cilindro se une con el vástago formando una unión prismática entre la cual se encuentra el resorte. Finalmente, se ensambla una unión universal en la base. Por su parte el modelo b consiste en la unión UR. Esta se basa en un eje unido a una unión universal en la parte superior de la plataforma móvil y un rodamiento en la parte inferior base del mecanismo. Dicho eje es conectado a un resorte lineal que hace que la unión tenga una rigidez rotacional.

Figura 3.2. Brazos del mecanismo paralelo del sensor, a) unión UPE, b) unión UR

Como resultado de este mecanismo se obtienen 3 grados libertad en el centro de movimiento esférico del mecanismo. En la figura 3.3 se puede observar el movimiento esférico en el sensor.

Figura 3.3. Movimiento esférico del sensor

Se colocaron dos IMUs en el sensor, uno en el centro de la esfera y otro en la base del sensor, de tal manera que pudiese medirse la posición angular relativa de la plataforma del sensor. Como se observa en la figura 3.4, la IMU1 se encuentra en el centro de la esfera, bañada en epoxi para la impermeabilización electrónica, y la IMU 2 en la base del sensor.

Figura 3.4 Posición de las IMUs en el sensor mecánico

En la figura 3.5 se muestra el sensor mecánico construido. El material utilizado es ABS, impreso en 3D. Se puede observar el mecanismo paralelo, con cada uno de sus brazos, la esfera y el cable I2C, que permite la transmisión de los datos de las IMUs.

Figura 3.5 Sensor mecánico construido

El detalle de cada uno de los brazos se observa en la figura 3.6, donde se puede observar en a) las uniones UPEs, con sus respectivos resortes y en b) la unión UR. En esta última se puede apreciar una conexión mecánica con un cable que está unido a un resorte interior y que le da a este eje una rigidez rotacional como se ha mencionado anteriormente.

Figura 3.6 Detalle de los brazos a) unión UPE, b) unión UR

En la figura 3.7 se pudo observar la prueba mecánica de los grados de libertad del mecanismo. Dicho experimento consiste en mover la esfera de tal manera que se rota el centro del movimiento esférico del mecanismo en los ejes a) Y, b) X, c) Z.

Figura 3.7 Prueba mecánica del sensor, se realiza movimientos circulares en los ejes a) Y, b) X, c) Z.

3.2 Análisis cinemático

En la figura 3.8 se muestra un diagrama simplificado del mecanismo paralelo que usa el sensor, donde los ejes de coordenadas se ubican en la unión 1, centro de movimiento esférico del mecanismo. Nótese que la plataforma móvil del mecanismo está representada por un triángulo isósceles para que las distancias de las uniones delanteras sean iguales respecto al centro del movimiento esférico. L_1 y L_2 representan las uniones UPR y M la unión UR del mecanismo.

Figure 3.8. Diagrama simplificado del mecanismo paralelo, donde el plano triángulo es isósceles y la línea de longitud 'e' es la media del triángulo. La esfera también es representada, y dentro de este se encuentra la IMU. F_s es la fuerza resultante de las fuerzas hidrodinámicas, y r es el vector del centro de coordenadas a la IMU.

3.2.1. Cálculo de la cinemática inversa

Para desarrollar la cinemática inversa, la posición de cada unión es calculada con las matrices de rotación (González y otros, 1989), (Wen, 1999), todo respecto al marco de referencia X, Y, Z localizado en la unión 1. Calculando cada punto obtenemos:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = R(q_x, q_y, q_z) \begin{bmatrix} b \\ e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} = R(q_x, q_y, q_z) \begin{bmatrix} -b \\ e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde, q_x, q_y, q_z son los ángulos de orientación de la plataforma en la unión. Por lo tanto, los desplazamientos de cada pierna estarían determinado por las siguientes ecuaciones:

$$L_1 = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2 + (z_3 - z_4)^2} \quad (3.3)$$

$$L_2 = \sqrt{(x_5 - x_6)^2 + (y_5 - y_6)^2 + (z_5 - z_6)^2} \quad (3.4)$$

$$M = q_z \quad (3.5)$$

De esta manera, los desplazamientos de L1, L2 y el de rotación M, son calculados dependiendo de la orientación de los ángulos.

3.2.2. Cálculo de la Matriz Jacobiana

El cálculo de la Matriz Jacobiana será resuelto mediante la teoría de Screw (Davidson, 2002), (Zhao, 2014). Para esto primero se ha calculado el Twists de cada unión, el cual obtenemos lo siguiente:

$$\hat{\$}_1 = \begin{bmatrix} u_{1i} \\ b_i \times u_{1i} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\hat{\$}_2 = \begin{bmatrix} u_{2i} \\ b_i \times u_{2i} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\hat{\$}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{3i} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\hat{\$}_4 = \begin{bmatrix} u_{4i} \\ a_i x u_{4i} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\hat{\$}_5 = \begin{bmatrix} u_{5i} \\ a_i x u_{5i} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\hat{\$}_6 = \begin{bmatrix} u_{6i} \\ a_i x u_{6i} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\hat{\$}_7 = \begin{bmatrix} u_7 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\hat{\$}_8 = \begin{bmatrix} u_8 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\hat{\$}_9 = \begin{bmatrix} u_9 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Ahora, identificamos un Screw (\$r) que es recíproco (An y otros, 2017), (Saltarén, 2017), para todas las uniones, el cual obtenemos:

$$\hat{\$}_r = \begin{bmatrix} (a_2 x u_{3,i})^T & u_{3,i}^T \\ u_9^T & 0^T \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Después aplicamos el producto entre recíprocos (Alvarado y otros, 2010), (Martínez y otros, 2006). Y obtenemos que;

$$\hat{\$}_{r,i}^T \$_p = v_i \hat{\$}_{r,i}^T \$_i \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} (a_2 x u_{3,i})^T & u_{3,i}^T \\ u_9^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{r3,i}^T \$_{3,i} & 0 \\ 0 & \hat{\$}_9^T \$_9 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} v_{3,1} \\ v_{3,2} \\ w_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_2 x u_{3,1})^T \\ (a_2 x u_{3,2})^T \\ u_9^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} v_{3,1} \\ v_{3,2} \\ w_9 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

De esta manera, obtenemos la matriz Jacobiana del mecanismo paralelo.

$$J = \begin{bmatrix} (a_2 x u_{3,1})^T \\ (a_2 x u_{3,2})^T \\ u_9^T \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Una importante limitación del mecanismo paralelo es las configuraciones singulares que pueden existir dentro del espacio de trabajo, donde el mecanismo puede ganar o perder grados de libertad y puede llegar a ser incontrolable. Además, las fuerzas de los actuadores pueden llegar a ser tan grandes y tener como resultado la rotura del mecanismo, por lo que es de gran importancia evitar estas singularidades dentro del espacio de trabajo (Taghirad, 2013).

Por esta razón, se analiza el espacio de trabajo, que es calculado con las ecuaciones cinemáticas explicadas anteriormente, mientras que la singularidad es determinada con la ecuación (3.20). Cuando la determinante de la Matriz Jacobiana es cero, dicho punto es una singularidad.

$$\det(J) = 0 \quad (3.20)$$

En la Figura 3.9 se muestra el espacio de trabajo (superficie roja) y las singularidades (superficie amarilla) del mecanismo paralelo. Se puede observar que se tiene muy pocas singularidades, porque casi todos se encuentran fuera del espacio de trabajo del mecanismo paralelo.

Figure 3.9 Espacio de trabajo (superficie roja) y singularidades (superficie amarilla) del mecanismo paralelo.

3.3 Análisis dinámico

La dinámica del mecanismo será resuelta mediante el principio del trabajo virtual (Franz, 2012), (Antman y otros, 1979), el cual según este principio la ecuación que describe la dinámica de mecanismo paralelo es la siguiente (Khalil y otros, 2007).

$$J^T \tau + F_p + \sum_{i=1}^2 (J_{i1}^T F_{i1} + J_{i2}^T F_{i2}) + J_3^T F_3 = \tau_a \quad (3.21)$$

Donde J es la matriz Jacobiana del mecanismo paralelo, τ es el vector de fuerzas y torques en cada actuador pasivo, τ_a es un vector de torque en la unión 1, F_p es la fuerza aplicada en la plataforma, J_{i1}^T es la matriz jacobiana del brazo i del actuador 1, F_{i1} es la fuerza del cilindro i , J_{i2}^T es la matriz Jacobiana de brazo i del actuador 2, F_{i2} es la fuerza del pistón del actuador i , J_3^T es la Jacobiana de actuador rotacional en la unión 2, y F_3 es el torque de la unión rotación 2.

3.3.1. Fuerzas resultantes debido a la flotabilidad

Los fluidos generan una fuerza de empuje. La fuerza resultante entre el peso y esta fuerza (Mott, 1996), (Agrawal y otros, 2013) está determinada por la siguiente ecuación.

$$\overrightarrow{f_{m_i}} = m_i \vec{g} - \rho \vec{g} v_i \quad (3.22)$$

Donde $\overrightarrow{f_{m_i}}$ es la fuerza resultante debido a la fuerza de flotabilidad, m_i es la masa del cuerpo i , $\vec{g}$ es el vector de gravedad, ρ es la densidad del fluido v_i es el volumen del cuerpo i . Despejando la masa y la gravedad, obtenemos lo siguiente;

$$\overrightarrow{f_{m_i}} = m_i \vec{g} \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_i} \right) \right) \quad (3.23)$$

Donde ρ_i es la densidad del cuerpo i . Podemos ver que la relación entre densidad es constante. Por lo que Podemos simplificar la ecuación, siendo reemplazada esta relación por la constante λ_i de tal manera que la fuerza resultante sería lo siguiente.

$$\overrightarrow{f_{m_i}} = m_i \vec{g} \lambda_i \quad (3.24)$$

3.3.2. Matriz de fuerzas y torques de cada brazo

La fuerza de cada brazo es calculada con el desplazamiento de cada resorte.

$$\tau = \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \tau_m \end{vmatrix} \quad (3.25)$$

Donde f_1 es la fuerza del brazo L_1 , f_2 es la fuerza del brazo L_2 , y τ_m es el torque del brazo M. Estas fuerzas son calculadas de la siguiente manera.

$$f_1 = -\Delta L_1 k_L - \Delta v_{3,1} B_L \quad (3.26)$$

$$f_2 = -\Delta L_2 k_L - \Delta v_{3,2} B_L \quad (3.27)$$

Donde k es el coeficiente de rigidez y B es el coeficiente de amortiguamiento de los resortes. Sin embargo, para hallar el torque en el brazo M, hay que tener en cuenta la configuración de este resorte con el eje. En la figura 3.10 se muestra la conexión simplificada de este sistema.

Figura 3.10. Modelo simplificado de la conexión entre el resorte y la unión UR. Esta conexión permite la transformación de la fuerza lineal del resorte en torque en el eje Z.

De este modo es como la fuerza lineal del resorte es transformada en torque en el eje de la unión UR, Donde el eje de rotación es q_z , $\vec{L}_f$ es la deformación final del resorte y $\vec{f}_3$ es la fuerza generada. El vector $\vec{L}_f$ es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$\vec{L}_f = (R \sin(q_z), ((R + L_0) - R \cos(q_z)), 0)^T \quad (3.28)$$

Donde R es el radio del eje de rotación y q_z es la orientación del ángulo en el eje Z de la plataforma. El vector $\vec{R}$ es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\vec{R} = (R \sin(q_z), R \cos(q_z), 0)^T \quad (3.29)$$

La deformación del resorte está determinada por;

$$\Delta L = \|\vec{L}_f\| - L_0 \quad (3.30)$$

Por lo que la fuerza $\vec{f}_3$ sería lo siguiente:

$$\vec{f}_3 = (-\Delta L k_m) \times \widehat{L}_f \quad (3.31)$$

Donde $\widehat{L}_f$ is the unitary vector of $\vec{L}_f$. Finalmente, el torque en el eje rotacional es,

$$\tau_m = \|\vec{R} \times \vec{f}_3\| \quad (3.32)$$

3.3.3. Plataforma del mecanismo paralelo

La gravedad y la flotabilidad son fuerzas de acción, y los grados de libertad de la plataforma es angular, por lo que el Wrench tendrá solo torque y no fuerzas, de tal manera que resolviendo se obtiene lo siguiente.

$$F_p = \begin{bmatrix} F \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -I_{cp}\dot{w}_p - w_{px}I_{cp}w_p + C \times m_p \times \vec{g}\lambda_p \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Donde C es el centroide de la plataforma, m_p es la masa de la plataforma, I_{cp} es su inercia, w_p es la velocidad angular, $\vec{g}$ es el vector de gravedad, y λ_p es la relación entre densidades de la plataforma y el fluido.

3.3.4. Cilindro del actuador lineal i

El cilindro es afectado por la gravedad y su aceleración lineal.

$$F_{i1} = \begin{bmatrix} F \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i1}(\vec{g}\lambda_{i1} - a_{i1}) \\ -I_{ci1}\dot{w}_i - w_{ix}I_{ci1}w_i \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Donde m_{i1} es la masa del cilindro, a_{i1} es la aceleración lineal, w_i es la velocidad angular del actuador L_i en la unión inferior (4 o 6), I_{ci1} es su inercia, y λ_{i1} es la relación entre la densidad del cilindro y la del fluido.

3.3.5. Vástago del actuador lineal i

De la misma manera, se resuelve;

$$F_{i2} = \begin{bmatrix} F \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i2}(\vec{g}\lambda_{i2} - a_{i2}) \\ -I_{ci2}\dot{w}_i - w_{ix}I_{ci2}w_i \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Donde m_{i2} es la masa del vástago, a_{i2} es la aceleración lineal, I_{ci2} es su inercia, y λ_{i2} es la relación de densidades.

3.3.6. Actuador rotacional

Esta unión es solo afectada por la gravedad, flotabilidad, y velocidad angular.

$$F_3 = \begin{bmatrix} F \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_3\vec{g}\lambda_3 \\ -I_{c2}\dot{w}_3 - w_{3x}I_{c2}w_3 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Donde m_3 es la masa del eje rotacional, $\dot{w}_3$ es la aceleración angular, w_3 es la velocidad angular, I_{c2} es su inercia, y λ_{i2} es la relación entre densidades.

3.3.7. Velocidades y aceleraciones angulares

Las velocidades angulares y las aceleraciones del cilindro y del vástago son calculadas. Para esto definimos primero los vectores unitarios de cada brazo, los cuales son,

$$\vec{S}_1 = \frac{[(p_{3x}-p_{4x}), (p_{3y}-p_{4y}), (p_{3z}-p_{4z})]^T}{|[(p_{3x}-p_{4x}), (p_{3y}-p_{4y}), (p_{3z}-p_{4z})]^T|} \quad (3.37)$$

$$\vec{S}_2 = \frac{[(p_{5x}-p_{6x}), (p_{5y}-p_{6y}), (p_{5z}-p_{6z})]^T}{|[(p_{5x}-p_{6x}), (p_{5y}-p_{6y}), (p_{5z}-p_{6z})]^T|} \quad (3.38)$$

$$\vec{S}_3 = [0,0,1]^T \quad (3.39)$$

Donde $\vec{S}_1$ es el vector del actuador L_1 , $\vec{S}_2$ es el vector del actuador L_2 , y $\vec{S}_3$ es el vector unitario del actuador M , respecto al marco de referencia en la unión 1. Entonces los vectores de la plataforma triangular son,

$$\vec{a}_1 = [(p_{3x} - p_{1x}), (p_{3y} - p_{1y}), (p_{3z} - p_{1z})] \quad (3.40)$$

$$\vec{a}_2 = [(p_{5x} - p_{1x}), (p_{5y} - p_{1y}), (p_{5z} - p_{1z})] \quad (3.41)$$

$$\vec{h} = [(p_{2x} - p_{1x}), (p_{2y} - p_{1y}), (p_{2z} - p_{1z})] \quad (3.42)$$

Ahora, las velocidades de cada actuador serán calculadas. En el caso del actuador L_1 , la velocidad tangencial (Featherstone, 2008), de L_1 y la plataforma en la unión 3 se igualan. Por lo que obtenemos la siguiente ecuación

$$w_1 \times \vec{L_1} = w_p \times \vec{a_1} \quad (3.43)$$

Resolviendo esto, obtenemos.

$$w_1 \times L_1 \times \vec{S_1} = w_p \times \vec{a_1} \quad (3.44)$$

$$w_1 = -\left(\frac{1}{L_1}\right) \vec{S_1} \times w_p \times \vec{a_1} \quad (3.45)$$

Así la ecuación (3.45) describe la velocidad angular de L_1 en la unión 4. De la misma forma, L_2 es resuelto y obtenemos que,

$$w_2 = -\left(\frac{1}{L_2}\right) \vec{S_2} \times w_p \times \vec{a_2} \quad (3.46)$$

La velocidad del eje de rotación sería determinada simplemente con la siguiente ecuación.

$$w_3 = \vec{S_3} \times w_p \quad (3.45)$$

De la misma manera igualando las aceleraciones tangenciales, en L_1 , obtenemos su aceleración angular.

$$\dot{w}_1 = \left(\frac{1}{L_1}\right) \times \vec{S_1} \times ac_3 - 2 \dot{L_1} w_1 \quad (3.46)$$

Donde ac_3 es la aceleración en la unión 3, y es determinada por la siguiente ecuación.

$$ac_3 = \dot{w}_p \times \vec{a_1} + w_p \times (w_p \times \vec{a_1}) \quad (3.47)$$

De la misma forma, la aceleración es resuelta en L_2

$$\dot{w}_2 = \left(\frac{1}{L_2}\right) \times \vec{S_2} \times ac_5 - 2 \dot{L_2} w_2 \quad (3.48)$$

Donde ac_5 es la aceleración en la unión 3, y está determinada por

$$ac_5 = \dot{w}_p \times \vec{a_2} + w_p \times (w_p \times \vec{a_2}) \quad (3.49)$$

Y la aceleración angular del eje M, sería

$$\dot{w}_3 = \frac{dw_3}{dt} \quad (3.50)$$

3.3.8. Matriz Jacobiana de cada brazo

La velocidad del centro de masa del cilindro está determinada por

$$v_{i1} = c_{i1} (w_i \times \vec{S}_i) \quad (3.51)$$

$$v_{i1} = -\frac{c_i}{L_i} \left[\vec{S}_i^2 - \vec{S}_i^2 a_i \right] \dot{X} \quad (3.52)$$

Donde C_i es el centro de masa del cilindro y $\dot{X}$ es la velocidad del efector final. Ahora resolvemos para el caso del vástago.

$$v_{i2} = c_{i2} (w_i \times \vec{S}_i) + L_i \vec{S}_i \quad (3.53)$$

$$v_{i2} = \left[-\frac{c_{i2}}{L_i} \vec{S}_i^2 + \vec{S}_i \vec{S}_i^T \quad \frac{c_{i2}}{L_i} \times \vec{S}_i^2 \times a_i \quad -\vec{S}_i \vec{S}_i^T \times a_i \right] \quad (3.54)$$

Finalmente, la velocidad angular de cada actuador con respecto al efector final estaría dado por

$$w_i = \frac{1}{L_i} \left(\vec{S}_i \times Vp + \vec{S}_i \times (wp \times a_i) \right) \quad (3.55)$$

$$w_i = \frac{1}{L_i} \left[\vec{S}_i - \vec{S}_i \times a_i \right] \begin{bmatrix} Vp \\ Wp \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Donde Vp es la velocidad del efector final del mecanismo paralelo. En este caso como solo es angular su velocidad es cero, y Wp es la velocidad angular del efector final. Por lo que, la matriz Jacobiana del cilindro sería lo siguiente

$$J_{i1} = \frac{1}{L_i} \begin{bmatrix} -C_i \vec{S}_i^2 & C_i \vec{S}_i^2 a_i \\ \vec{S}_i & -\vec{S}_i \times a_i \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Y la matriz Jacobiana del vástago es

$$J_{i2} = \frac{1}{L_i} \begin{bmatrix} -\frac{c_{i2}}{L_i} \vec{S}_i^2 + \vec{S}_i \vec{S}_i^T & c_{i2} \times \vec{S}_i^2 \times a_i - \vec{S}_i \vec{S}_i^T \times a_i \\ \vec{S}_i & -\vec{S}_i \times a_i \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Como el eje rotacional está directamente anclada al efector final del mecanismo paralelo, su matriz Jacobiana estaría determinado por la siguiente ecuación,

$$J_3 = [\vec{S}_3] \quad (3.59)$$

3.3.9. Torque generado por las fuerzas del fluido en la esfera

Las fuerzas dinámicas del fluido en un cuerpo están determinadas por la siguiente ecuación (Antonelli, 2006).

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + G = F_s \quad (3.60)$$

Donde F_s es la fuerza resultante de las fuerzas fluidodinámicas en un cuerpo, M es la matriz de inercia (incluyendo la masa añadida), C es el vector de Coriolis y la fuerza centrípeta, D es el efecto de amortiguamiento del fluido, G es el efecto de la flotabilidad. Como en este caso es solo una esfera, la ecuación es resuelta de la siguiente manera;

$$(m_s + m_s')\vec{a}_s + \vec{f}_a + m_s\vec{g}\lambda_s = \vec{F}_s \quad (3.61)$$

Donde m_s es la masa de la esfera, m_s' es la masa añadida, $\vec{a}_s$ es el vector de aceleración de la esfera obtenida por la IMU, $\vec{f}_a$ es el vector de la fuerza de arrastre del fluido, y λ_s es la relación de densidades entre la esfera y el fluido.

La masa añadida en la esfera puede ser calculada de la siguiente manera (Fresoe, 1997),

$$m_s' = 0.5\rho v_s \quad (3.62)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y v_s es el volumen de la esfera.

Finalmente, el torque generado en la unión 1 del mecanismo paralelo está determinado por

$$\tau_a = \vec{r} \times \vec{F}_s \quad (3.63)$$

Donde $\vec{r}$ es el vector del centro de referencia al centro de la IMU.

Ya que nos interesa encontrar la fuerza de arrastre, tenemos que invertir $\vec{r}$. Por esta razón, arreglamos la ecuación como una matriz antisimétrica (Kanatani, 2015). Finalmente reemplazando en la ecuación (3.21), la fuerza de arrastre es calculada.

$$(3.64)$$

$$[r]^{-1}_x (J^T \tau + F_p + \sum_{i=1}^2 (J_{i1}^T F_{i1} + J_{i2}^T F_{i2}) + J_3^T F_2) - m_s \vec{g} \lambda_s - (m_s + m'_s) \vec{a}_s = \vec{f}_a$$

3.3.10. Velocidad y dirección del fluido

La velocidad y dirección del fluido, es posible calcularla con la ecuación de la fuerza de arrastre de los fluidos

$$v = \sqrt{\frac{\|f_a\|}{C_D 0.5 \rho A}} \quad (3.65)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre de la esfera, ρ es la densidad del fluido, y A es el área transversal de la esfera.

El coeficiente de arrastre de la esfera varía según el número de Reynolds, como se observa en la figura 3.11. Este coeficiente puede ser constante cuando el número de Reynolds es $10^3 R_e$, con un valor de 0.47. Los investigadores Milkailov y Silvia Freire (Mikhailov, 2013), muestran diferentes ecuaciones para calcular el coeficiente de arrastre. De acuerdo con este criterio la esfera es diseñada para mantener un coeficiente de arrastre constante.

Figura 3.11. Coeficiente de arrastre (C_D) de una esfera versus el número de Reynolds (R_e). Podemos ver que el coeficiente de fuerza de arrastre es constante empezando de $10^3 R_e$; con un valor aproximado de 0.47.

Finalmente, la dirección del fluido es calculada con el vector unitario de la fuerza de arrastre (f_a).

$$\hat{u} = \frac{\vec{f}_a}{\|f_a\|} \quad (3.66)$$

2. Algoritmo y simulación

En la figura 3.12 se muestra el algoritmo, que se propone para calcular la velocidad del fluido y su dirección a partir de los datos obtenidos de la IMU. Primero se inicializa el algoritmo con la obtención de las constantes ya mencionadas en los modelos matemáticos, luego se

adquieren los datos que mide la IMU, que son la posición angular de la plataforma y las aceleraciones de la esfera. Mediante el uso de la cinemática inversa se calculan las posiciones de los brazos con las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) y después se calculan las velocidades y aceleraciones de estos brazos usando la Matriz Jacobiana (3.19). A continuación, se calcula la fuerza de arrastre con la ecuación dinámica (3.64), el cual será un vector de las tres fuerzas espaciales. Finalmente se calcula la velocidad del fluido con la ecuación (3.65) y también su dirección (3.66).

Figura 3.12. Algoritmo para calcular la velocidad y dirección del fluido con el mecanismo paralelo.

Para la simulación del algoritmo, se ha empleado una co-simulación de Matlab y Msc. Adams. El algoritmo fue programado en Matlab y el mecanismo paralelo diseñado en Adams, El fluido considerado en esta simulación es agua con una densidad de $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. En la figura 3.13, se muestra el proceso de simulación. Primero se ingresa la velocidad del agua, variado la velocidad desde 0 m/s a 5.5 m/s en dirección del eje X con una variación

sinusoidal, en este caso el software Adams, transforma esta velocidad en fuerza de arrastre aplicada en la esfera.

Esta fuerza deforma la estructura del mecanismo paralelo y un sensor virtual dentro de la esfera mide los ángulos y aceleraciones, simulando de esta manera la IMU. Estos ángulos y aceleraciones fueron ingresadas en el algoritmo en Matlab y este calculó la velocidad y dirección del agua. Estos resultados fueron comparados con la velocidad de entrada para corroborar el funcionamiento del algoritmo.

Figure 3.13. Método de simulación para la prueba del algoritmo.

En la tabla 3.1 se muestra las características físicas del sensor para su construcción y simulación.

VALORES GEOMÉTRICOS Y MASAS		
Geometría (mm)	Masa (kg)	Constante de resortes(N/m)
$L_1 = 100$		
$L_2 = 100$		
$h = 100$		
$H = 28$	$m_s = 0.18$	$k_L = 121$
$b = 15$	$m'_s = 0.0625$	$k_m = 1328$
$a = 41$		
$R = 4$		
Diámetro de la esfera= 62 mm		

Tabla 3.1. Características físicas del sensor mecánico

En la figura 3.14 se muestra los resultados de la simulación, la línea naranja representa la velocidad de entrada del fluido en el simulador, que varía desde 0 a 5.5 m/s. Y la línea azul representa la velocidad calculada con el algoritmo propuesto. Se puede apreciar que el sensor mide correctamente hasta los 3.5 m/s, a partir de

entonces, se aprecia que el error comienza a incrementar y luego decae y nos muestra valores oscilatorios.

Figure 3.14. Resultados de la simulación, la línea naranja representa la velocidad del fluido simulada y la línea azul la velocidad del fluido calculada con el algoritmo

La razón de este error de medida se debe a que el mecanismo a partir de los 3.5 m/s empieza a acercarse a una singularidad. Como se observa en la figura 3.15, la determinante de la jacobiana empieza a decaer a partir de los 30 segundos, momento en el que la velocidad supera los 3.5 m/s. Es entonces cuando este valor desciende hasta cero indicándonos que el mecanismo ha entrado en una singularidad, por lo que la medida es errónea y el sensor ha dejado de funcionar.

Figure 3.15. Determinante de la Jacobiana, se observa que el valor empieza a decaer, hasta ser menor que cero, indicándonos que el mecanismo ha pasado por una singularidad.

3.5 Desarrollo de software

El software fue desarrollado en LabVIEW, implementando el algoritmo que se ha presentado en la figura 3.12 para el cálculo de las velocidades del fluido mediante la información adquirida por la IMU. Esta última es enviada mediante el protocolo de comunicación I²C a un microcontrolador, el cual a su vez, mediante un puerto serie, envía la información de los ángulos y aceleraciones al software. Este programa inicia leyendo el puerto serie, como se observa en la figura 3.16 con una velocidad de 115200 baudios.

Figure 3.16. Lectura de la IMU mediante el puerto serie

A continuación, el algoritmo se ejecuta en un bucle “while”, se leen los datos y se adquieren los valores de los ángulos en los ejes X, Y, Z y las aceleraciones obtenidas por la IMU. Este proceso se puede apreciar en la figura 3.17.

Figure 3.17. Lectura de los ángulos y aceleraciones obtenidas por la IMU

Posteriormente en un “MathScrip” se calcula la cinemática inversa, determinando las deformaciones de cada resorte y también determinando la matriz Jacobiana (ver figura 3.18). Una vez obtenidos estos valores, se calcula la dinámica inversa para después conseguir las fuerzas en los ejes X, Y, Z que son aplicadas por la fuerza de arrastre del fluido.

Figure 3.18. Cálculo de la cinemática inversa, la matriz Jacobiana y cálculo de la dinámica inversa

Conocidas las fuerzas se calcula la velocidad del fluido mediante la ecuación de la fuerza de arrastre para hallar el valor unitario del vector de fuerza. Esto se ejecuta en un MathScrip, como se observa en la figura 3.19.

Figure 3.19. Cálculo de las velocidades y dirección del fluido mediante la ecuación de la fuerza de arrastre

3.6 Experimentación

Para la demostración del sensor, se construyó un sistema, como se muestra en la figura 3.20. El sensor se localiza en un riel que permite moverse horizontalmente a través del agua en un tanque con unas dimensiones de $800 \times 800 \times 300$ mm. Además, el sensor se encuentra conectado a un cordón en su base. Este a su vez está conectado a un encoder lineal (Nyce, 2004) a través de una polea fija. El tipo de encoder que se usó es un AN-LX-EP-40 de UniMeasure. La resolución de medida es de $2.4 \pm 0.35\%$ count/mm, con una presión de 0.4 mm/count. El elemento sensor del encoder es un óptico incremental con una entrada eléctrica que consiste en dos ondas cuadradas tipo TTL (transistor–transistor logic) (Stephan, 2015) y un canal de salida en cuadratura. Cuando el sensor mecánico se mueve, su desplazamiento es igual al del encoder lineal, debido a la conexión del cordón. De esta manera se mide la velocidad relativa del sensor con respecto al fluido.

Figura.3.20. Modelo del sistema de experimentación del sensor mecánico

En la figura 3.21, se muestra el tanque usado para la demostración experimental. El tanque está lleno de agua hasta 260 mm de altura. Se puede apreciar claramente el sensor en el riel, la polea y el encoder.

Figura.3.21. Tanque de agua usado para la demostración experimental del sensor mecánico

La estrategia para la adquisición de los datos se muestra en la figura 3.22. La medida del encoder lineal es leída por un Arduino mediante entrada digital. Las medidas de la IMU1 y la IMU2 también son leídas por el Arduino a través de I^2C (Inter-Integrate Circuit) (Paret, 1986). Además, el Arduino está programado para calcular la velocidad lineal del encoder y los ángulos relativos entre la base del sensor y el centro de movimiento esférico, como también las aceleraciones relativas entre la esfera y la base del sensor. Estos datos ingresan al ordenador a través de un USB (Universal Serial Bus), en donde el algoritmo desarrollado en LabVIEW es ejecutado. Finalmente, la velocidad del fluido es calculado por el algoritmo y se compara con la velocidad obtenida por el encoder lineal.

Figura 3.22. Modelo de adquisición de datos del encoder lineal y el sensor mecánico.

El principio de la demostración experimental está basado en el movimiento de velocidad del sensor mecánico, el cual es igual a la velocidad del fluido en sentido opuesto. El encoder lineal mide la velocidad de la base del sensor mecánico, que se consideraría la velocidad real del fluido. Esta es comparada con la velocidad calculada por el sensor mecánico de manera que es posible determinar si el sensor es capaz de medir la velocidad del fluido. A continuación, se detalla cómo fue la realización de los 3 experimentos basados en la dirección de la fuerza hidrodinámica.

3.6.1. Primer experimento

El primer experimento se basa en la dirección del movimiento de la fuerza hidrodinámica a lo largo del eje X del marco de referencia del mecanismo paralelo. En la figura 3.23 se muestra el sensor mecánico en la posición adecuada para obtener este efecto. La dirección del movimiento se encuentra en paralelo de eje X del mecanismo paralelo. El experimento consiste en un movimiento oscilatorio del sensor en el riel.

Figura 3.23. Arreglo en el eje X del sensor mecánico para el primer experimento.

En la figura 3.24 se muestra una serie fotográfica del experimento realizado, el cual se basó en 9 movimientos oscilatorios durante un periodo de 30 segundos.

Figura 3.24. Movimiento oscilatorio del sensor.

Los resultados de este experimento se muestran en la figura 3.25, en donde la línea azul es la velocidad calculada por el sensor mecánico y la roja es la velocidad real del fluido calculada por el encoder lineal. Se pudo apreciar que el coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.97$.

Figura 3.25. Resultados de la medida de la velocidad del fluido en dirección del eje X.

El error absoluto se muestra en la figura 3.26, donde la línea azul es la variación en el tiempo del error y la línea roja la media de ese error que tiene un valor de 0.008 m/s.

Figura 3.26. Error absoluto de la medida del sensor respecto al encoder con una media de 0.008 m/s.

3.6.2. Segundo experimento

El segundo experimento consiste en mover el sensor a lo largo del eje Y, respecto al marco de referencia del mecanismo paralelo. En la figura 3.27 se muestra el sensor mecánico en la posición adecuada para que la fuerza de arrastre sea paralela a la dirección de movimiento en el eje Y. De la misma manera el experimento consiste en el movimiento oscilatorio del sensor a lo largo del rail.

Figura 3.27. Arreglo en el eje Y del sensor mecánico para el primer experimento

En la figura 3.28 se muestra el proceso de experimentación del sensor, con el movimiento oscilatorio de derecha a izquierda en el riel. Se realizaron 10 movimientos por un periodo de 30 segundos.

Figura 3.28. Secuencia fotográfica del segundo experimento, puede apreciar el movimiento oscilatorio de derecha a izquierda.

En la figura 3.29 se muestra los resultados obtenidos del segundo experimento, en donde la línea azul es la velocidad medida con el sensor mecánico y la línea roja es la medida de la velocidad con el encoder lineal. El coeficiente de determinación obtenido en este caso fue de $R^2 = 0.89$

Figura 3.29. Resultados de la medida en el eje Y

El error absoluto de la medida se muestra en la figura 3.30, se muestra una serie oscilaciones que varían desde 0 a 0.14 m/s. La media de este error es de 0.02 m/s.

Figura 3.30. Error absoluto de la media del sensor con respecto a la medida con el encoder.

3.6.3. Tercer experimento

El tercer experimento se basa en medir la velocidad entre los ejes X y Z, en el marco de referencia del sensor mecánico. Para esto el sensor se adjunta en una base de 30° de inclinación, tal como se muestra en la figura 3.31. De la misma manera que los anteriores experimentos, este se basa en el movimiento oscilatorio a lo largo del riel.

Figura 3.31. Arreglo del sensor para el tercer experimento en una base de 30° de inclinación

En la figura 3.32 se puede apreciar el proceso de experimentación, con una secuencia fotográfica, en la cual se muestra el movimiento oscilatorio de izquierda a derecha. El experimento se realizó por un periodo de 30 segundos.

Figura 3.32. Secuencia fotográfica del tercer experimento. Se puede apreciar el movimiento oscilatorio del sensor.

En la figura 3.33 se muestra los resultados de la medida de velocidad en el eje X, donde la línea azul es la medida con el sensor mecánico y la roja la medida con el encoder, ambas superpuestas y comparadas, obteniéndose un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.96$

Figura 3.33. Resultados de la medida de velocidad a lo largo del eje X

El error absoluto de la medida se muestra en la figura 3.34. el valor máximo es de 0.08 m/s y el mínimo de 0 m/s, la media del error total es de 0.015 m/s.

Figura 3.34. Error absoluto del sensor con respecto al encoder

En la figura 3.35 se muestra los resultados de la velocidad medida con el sensor mecánico (línea azul) en el eje Z y la velocidad del fluido medida con el encoder. Se han comparado los resultados y se ha obtenido un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.96$.

Figura 3.35. Resultados de la medida de velocidad a lo largo del eje Z

En la figura 3.36 se muestra el error absoluto de la medida del sensor mecánico. El máximo valor obtenido es de 0.05 m/s y el mínimo de 0 m/s, la media del error es de 0.009 m/s.

Figura 3.36. Error absoluto del sensor mecánico respecto al encoder.

3.7 Conclusión

Los resultados del primer experimento muestran que el sensor es capaz de medir la velocidad del fluido a lo largo del eje X. Por otro lado, se ha obtenido un coeficiente de determinación de 0.97, lo que quiere decir que el 97 % de los datos de la velocidad del fluido son descritos por el sensor mecánico. El error medio con respecto a los datos de la velocidad del fluido medida con el encoder es de 0.008%, lo que representa un 9 % de error relativo. Del mismo modo los resultados del segundo experimento demuestran que el sensor puede medir la velocidad del fluido en la dirección Y, obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.89, el cual nos indica que el 89 % de los datos del fluido pueden ser descritos por el sensor, con un error relativo de 14%. Finalmente, las velocidades medidas en el tercer experimento en los ejes X y Z coinciden con los datos de la medida del fluido en ambos casos. Los datos son descritos a 96 %, tal como indican los resultados del coeficiente de terminación, representando ambos un error relativo menor al 25 %. De los resultados obtenidos es posible concluir que el sensor basado en un mecanismo paralelo es capaz de medir la velocidad relativa del fluido en los tres ejes espaciales.

Capítulo 4

Robot bípedo planar subacuático

Los robots bípedos planares han sido desarrollados por diversos centros de investigación en robótica (Raibert, 1986), (Sreenath y otros, 2011), (Ramezani, 2014), (Chevallereau, 2003), para el estudio de locomoción, debido a su simplicidad y la posibilidad de repetibilidad de los experimentos. En este capítulo se diseña y construye un robot bípedo planar de actuación hidráulica para su locomoción en un entorno subacuático, describiéndose el diseño mecánico de las piezas, la construcción y el sistema hidráulico y de control. Se calculan las constantes hidrodinámicas del robot, mediante procesos de cálculo de elementos finitos y experimentación de modelos a escala y se desarrollan los modelos cinemáticos y dinámicos del robot bípedo planar, corroborados mediante simulación multi-cuerpo.

4.1 Diseño y construcción

En la figura 4.1 se muestra el diseño CAD del robot bípedo planar. Se puede apreciar que el robot bípedo se encuentra unido a través de un eje a una base fija mediante una unión universal. Este sistema permite al robot tener dos grados de libertad para desplazarse en los ejes X y Z del sistema de coordenadas restringiéndole movilidad en el eje Y. La ventaja de este sistema es que se pueden validar modelos de control en dos dimensiones que posteriormente pueden ser usados en tres dimensiones. Además, otra ventaja técnica es que permite que solo los actuadores se encuentren en el robot, mientras que los sistemas de control como servoválvulas (Merritt y otros, 1991), electrónica y ordenador, pueden ser ubicados muy lejos del robot. Por su parte, las conexiones al robot bípedo, como mangueras

hidráulicas, cables, etc. pueden ser guiados a través del eje, sin causar efecto a los grados de libertad del robot.

Figura 4.1. Robot bípedo planar

El eje tiene una longitud de 1 m y la altura de la columna de la base fija es de 0.6 m. El robot bípedo tiene una altura de 0.7 m y 0.2 m de ancho. En la figura 4.2 se muestra las partes que integran al robot. Se puede apreciar el sensor mecánico en la parte superior para medir la velocidad relativa del fluido. El robot cuenta con 4 actuadores hidráulicos lineales (Gupta, 2016). Los actuadores L1 y L2 son cilindros de doble efecto CyVal-serie-300, con una carrera máxima de 304 mm y 3mm de radio del pistón. Los actuadores que mueven Q1 y Q2 son de doble efecto tipo CH25KD, con 25 mm de radio del pistón y una carrera de 40 mm. Estos permiten el giro de la pierna mediante un mecanismo que transforma el movimiento lineal a rotacional.

El robot cuenta con dos sensores inerciales (IMU) (Esser y otros, 2009) para medir el ángulo de rotación de las patas (Q1, Q2). La razón por la que se usaron estos sensores es por su fácil estanqueidad gracias al diseño de una carcasa impresa en 3D donde la IMU es cubierto en Epoxi. Existe un sensor inercial más (IMU) en la base central del robot para medir su inclinación y aceleraciones. Los desplazamientos de los actuadores L1 y L2 son medidos mediante sensores flexibles sellados en una cubierta tubular. Este tipo de sensores varían su resistencia eléctrica al deformarse. Cuenta con dos sensores de presión resistivos, en cada pie, estos sensores se encuentran cubiertos de silicona para lograr su estanqueidad.

Figura 4.2. sensores y actuadores del robot bípedo

La pierna está unida a la base del robot mediante un cojinete, como se observa en la figura 4.3 A través del centro del cojinete se introduce el eje que va conectado a la unión universal de la base.

Figura 4.3 Unión de la pata a la base del robot

Como se ha mencionado anteriormente, Q1 y Q2 giran mediante la transformación del movimiento lineal del actuador hidráulico a movimiento circular mediante un mecanismo deslizando, como se observa en la figura 4.4.

Figura 4.4. Mecanismo deslizando

Cuando el vástago del actuador sale, este genera un par mecánico en el eje mediante el mecanismo deslizando, haciéndolo girar en sentido horario, como se observa en la figura 4.5.

Figura 4.5. Movimiento de la pierna sentido horario

Como se muestra en la figura 4.6, cuando el vástago del actuador ingresa, hace girar la pierna en el sentido contrario del reloj.

Figura 4.6. Movimiento de la pierna sentido antihorario

En la figura 4.7 se observa el proceso de construcción de la parte mecánica del robot bípedo. En concreto en a) se puede apreciar el robot ensamblado con todos los actuadores y el eje, en b) la base central del robot con los dos actuadores lineales y con un peso de 2.616 Kg, y en c) una de las piernas ensambladas que puede llegar a pesar 1,188 Kg.

Figura 4.7. Proceso de construcción del robot bípedo

El flujo del sistema de control del robot se muestra en la figura 4.8. El sistema, sumergido con el robot, empieza con la lectura de los sensores del robot mediante un Arduino DUE. Mediante un cable USB el Arduino envía los datos al ordenador, donde se encuentra el control de alto nivel, y este calcula la trayectoria del robot y envía las posiciones de cada actuador a la C-rio. Es aquí donde se ejecuta el control de posición para, a continuación, enviar las señales de voltaje a un transformador de corriente y después a las servo-válvulas.

Figura 4.8. Flujo de control del robot

En la figura 4.9 a) se muestra el ensamblaje de los sensores en el robot, siendo (1) el sensor mecánico, (2) los sensores IMU en la base del robot (3). En b) se aprecia el hardware de control, (4) es el manifold de distribución de aceite, donde ingresa el aceite a una presión de 20 bares antes de ser distribuido a las 4 servo-válvulas E050 (5). Estas son controladas por el actuador C-rio (8), el cual tiene un módulo analógico de salida de tensión de -10 V a 10 V. Estas salidas de tensión pasan por el convertidor de corriente (6) con salidas de -50 mA a 50 mA. Todo este sistema es alimentado por una fuente de tensión de 24 V (7).

Figura 4.9. a) sensores del robot, b) Hardware de control

En la figura 4.10 se muestra el sensor flexible, atado al actuador L1, mediante abrazaderas. La parte superior se ata al cilindro y la inferior, al vástago del actuador. Cuando el vástago sale del cilindro el sensor flexible se estira, aumentando su resistencia eléctrica, como se observa en a); y cuando el vástago ingresa al cilindro el sensor flexible se padea, disminuyendo su resistencia eléctrica, como se aprecia en b).

Figura 4.10. Sensor flexible en la pierna del robot a) sensor no pandeado b) sensor pandeado

En la figura 4.11 se muestra la conexión de las mangueras hidráulicas en cada uno de los actuadores. El tipo de manguera que se utilizó es semi-rígida y para una presión de funcionamiento de hasta 30 bares.

Figura 4.11. Conexión de mangueras hidráulicas en el robot

En la figura 4.12, se muestra el robot completamente construido. Se puede apreciar la base fija (1), la cual en su parte superior presenta la unión universal que se une al eje del robot bípedo. Las mangueras hidráulicas (2) son guiadas a través de este eje desde el robot a la base fija. En este eje también se encuentra el Arduino DUE (3) que se encuentra cubierto de epoxi para su estanqueidad. Finalmente se puede apreciar el robot bípedo (4), con todos sus actuadores y sensores.

Figura 4.12. Robot bípedo planar completamente construido

4.2 Cálculo de constantes hidrodinámicas

4.2.1. Masa añadida

Cuando un cuerpo rígido se mueve dentro de un fluido, la inercia adicional de este último alrededor del cuerpo también es acelerado. A esta inercia adicional se la conoce como masa añadida. Debido a que los métodos computacionales para calcular la masa añadida están todavía en desarrollo, la opción que se usará en esta investigación es la de pequeñas oscilaciones mediante la vibración libre de masa-resorte (Korotkin, 2008). Esta se basa en un método experimental con modelos a escala y que en diversas investigaciones ha tenido buenos resultados (Eng y otros, 2008), (Ross, 2004), (Morrison, 1993).

En la figura 4.13 se muestra el modelo de experimentación basado en este método. En ella se puede apreciar un depósito semi lleno de agua, en el cual se encuentra el modelo de la base del robot a una escala de 0.5. El robot está suspendido en un resorte de rigidez $k=120 \text{ N/m}$, y entre ellos también una masa de 0.5 kg , pero esta no se encuentra sumergido. El objetivo de esta masa es incrementar la fuerza vertical para que el sistema pueda vibrar, ya que el modelo a escala es afectado por la flotabilidad. El desplazamiento del resorte es medido por un encoder lineal desde la parte superior del sistema. La idea principal se basa en medir la frecuencia natural del sistema, ya que esta depende de la masa, entre ellas la masa añadida.

Figura 4.13. Modelo experimental de masa añadida

La masa añadida puede ser calculada mediante la siguiente ecuación (Fredsoe, 1997);

$$m' = C_m \rho_w V \quad (4.1)$$

Donde C_m es el coeficiente de masa añadida, ρ_w es la densidad del agua, y V es el volumen del cuerpo.

La ecuación de movimiento vibracional del sistema propuesto está determinada por la siguiente ecuación (Thomson, 1993),

$$y = A_Y e^{-\zeta w_d t} \cos(w_d t) \quad (4.2)$$

Donde y es la amplitud, A_Y es la máxima amplitud, ζ es el factor de amortiguamiento, w_d es la frecuencia de oscilación, y t es el tiempo. La frecuencia de oscilación es determinada por la siguiente ecuación (Thomson, 1993),

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.3)$$

Donde w_n es la frecuencia natural sin amortiguamiento. Debido a que ζ es normalmente pequeño comparado con la unidad, la frecuencia de oscilación w_d , se puede aproximar la frecuencia natural w_n ,

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2} \cong w_n \quad (4.4)$$

Donde (Fredsoe, 1997),

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m+m'}} \quad (4.5)$$

Donde K es la rigidez del resorte (120 N/m), m' es la masa añadida, y m es la masa del modelo más la masa adicional de 0.5kg. Mediante el uso del encoder lineal, los desplazamientos pueden ser medidos y medir la frecuencia natural del sistema. De esta manera es posible determinar la masa añadida y calcular el coeficiente mediante la ecuación 4.1.

En la figura 4.14 se muestra el experimento real para el cálculo de masa añadida. Se puede apreciar el depósito de agua semi lleno, la masa adicional de 0.5 Kg, el resorte y el encoder. El modelo a escala fue posicionado de dos formas, una de tal manera que la dirección de movimiento sea en la dirección X respecto al modelo de referencia del robot como se puede observar en a), y la otra en la dirección de movimiento en dirección del eje Z como se observa en b). La razón de esto es debido a que la masa añadida será diferente según la dirección de movimiento, ya que la geometría es irregular.

Figura 4.14. Experimento de masa añadida, a) experimento en el eje X, b) experimento en el eje Z

En la figura 4.15 se muestra un experimento de caída libre, en la cual se observa que la amplitud decae exponencialmente. Mediante la ecuación de la amplitud mostrada en la figura podemos obtener los valores de $\zeta = 0.0339$ y $w_d = 4.36$. El valor del factor de amortiguamiento es muy bajo indicándonos que la frecuencia de vibración puede aproximarse a la frecuencia natural.

Figura 4.15. Resultado oscilatorio de caída libre

De tal manera que se realiza 10 experimentos por cada eje a) y b), y se calcula su frecuencia y por ende su coeficiente de masa añadida. En la figura 4.16 se muestra los resultados de C_m que fueron obtenidos en 10 experimentos. La media del coeficiente de masa añadida fue de $C_m = 1.89$. Este valor puede ser reemplazado en la ecuación 4.1 con el volumen real del robot obteniendo una masa añadida de $m'_x = 4.2 \text{ kg}$

Figura 4.16. Coeficiente de masa añadida a lo largo del eje X

En la figura 4.17 se muestra los resultados obtenido del experimento b) a lo largo del eje Z, los 10 experimentos muestran una media de $C_m = 2,45$, Este valor puede ser reemplazado

en la ecuación 4.1 con el volumen real del robot, obteniendo una masa añadida de $m'_z = 5.4 \text{ kg}$.

Figura 4.17. Coeficiente de masa añadida a lo largo del eje Z

Por lo tanto, la matriz de masa añadida estaría dada por la siguiente ecuación

$$m' = \begin{bmatrix} 4.2 & 0 \\ 0 & 5.4 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Para determinar la masa añadida de las piernas y el eje de robot, se aproxima la geometría a la de un cilindro. El coeficiente de masa añadida de un cilindro es $C_m = 1$ (Fredsoe, 1997), de tal manera que, calculando con el volumen de cada geometría, obtenemos los siguientes valores en la tabla 4.1 de masa añadida.

Tabla 4.1. Masa añadida de las piernas y eje

Cuerpo	m(kg)	m' (kg)
L1	0.7	0.186
L2	0.7	0.186
Eje	0.5	0.079

4.2.2. Coeficientes de amortiguamiento

Los coeficientes de amortiguamientos pueden ser lineal y cuadrático, y también son diferentes para cada eje según la dirección del movimiento. Como nuestro robot es planar,

también es este caso se analizan los coeficientes en el eje X y en el eje Z. En la figura 4.18 se muestra uno de los experimentos mediante el cálculo computacional de fluidodinámica (CFD), se realizaron 7 experimentos variando la velocidad de 0 m/s a 4 m/s del fluido, en dirección del eje X (a) y en dirección del eje Z (b).

Figura 4.18. Cálculo de CFD, a) fluido en el eje X, b) fluido en el eje Z

En la figura 4.19 se muestra los resultados del experimento en el eje X, mediante una regresión cuadrática se puede obtener el coeficiente cuadrático $X_{u|u|} = 113.4 \text{ N s}^2/\text{m}^2$ y el coeficiente lineal $X_u = 18.6 \text{ N s/m}$

Figura 4.19. Resultados de la fuerza hidrodinámica en el eje X

En la figura 4.20 se muestra los resultados del experimento a lo largo del eje Z, aplicando el mismo método de regresión obtenemos que el coeficiente de amortiguamiento cuadrático es $Z_{u|u|} = 130.5 \text{ N s}^2/\text{m}^2$ y el coeficiente lineal $Z_u = 21.1 \text{ N s/m}$.

Figura 4.20. Resultados de la fuerza hidrodinámica en el eje Z

Por lo tanto, el amortiguamiento en el eje X y Z estaría determinada por la siguiente ecuación:

$$D_x = 113.4 |v_x| v_x + 18.8 v_x \quad (4.7)$$

$$D_z = 130.5 |v_z| v_z + 21.1 v_z \quad (4.8)$$

Donde v_x y v_z es la velocidad del fluido relativa en el eje X y Z respectivamente. Por lo que la matriz de amortiguamiento de la base del robot es la siguiente

$$D = \begin{bmatrix} (113.4 |v_{x0}| + 18.8) & 0 \\ 0 & (130.5 |v_{z0}| + 21.1) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.3 Análisis cinemático

En la figura 4.21 se muestra el diagrama de cuerpo libre para el cálculo de la cinemática inversa. En ella se analiza el marco de referencia de los ejes X y Z debido a que se trata de un robot planar. El pie debería seguir una trayectoria, siendo la óptima según algunos estudios la cicloide (Lei y otros, 2014), (Lui y otros, 1994), (Du y otros, 2016). La trayectoria está definida por la siguiente ecuación;

$$x = r(t - \text{sen}(t)) \quad (4.10)$$

$$z = r(1 - \cos(t)) \quad (4.11)$$

Donde r es el radio de la circunferencia que genera el cicloide y t es el tiempo

Figura 4.21. Diagrama de cuerpo libre para la cinemática inversa

Las ecuaciones de cinemática inversa de las posiciones de los actuadores respecto a la posición de efector final, que sería el pie del robot el cual forma la cicloide, están determinadas por las siguientes ecuaciones.

$$q = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) \quad (4.12)$$

$$l = \sqrt{x^2 + z^2} - C \quad (4.13)$$

Para hallar la matriz Jacobiana primero se encuentran las relaciones geométricas del efector final y los actuadores como se muestran en las siguientes ecuaciones.

$$z = (l + c)\cos(q) \quad (4.14)$$

$$x = (l + c)\sin(q) \quad (4.15)$$

Si se deriva con respecto al tiempo, obtenemos lo siguiente.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dl}{dt}c \cos(q) - \frac{dq}{dt}(l + c)\sin(q) \quad (4.16)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dl}{dt}\sin(q) + \frac{dq}{dt}(l + c)\cos(q) \quad (4.17)$$

Ordenándolo en forma matricial obtenemos la siguiente relación

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q) & -(l+c)\sin(q) \\ \sin(q) & (l+c)\sin(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{l} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Finalmente, la matriz Jacobiana estaría determinada por

$$J = \begin{bmatrix} \cos(q) & -(l+c)\sin(q) \\ \sin(q) & (l+c)\sin(q) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Para hallar las aceleraciones se deriva la ecuación 4.18 obteniéndose lo siguiente

$$\begin{bmatrix} \ddot{l} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \frac{d(J^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + J^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

4.4 Análisis dinámico

En la figura 4.22 se aprecia el diagrama de cuerpo libre para el análisis de la dinámica del robot. En dicho diagrama se pueden observar las fuerzas debidas al amortiguamiento del agua en la pierna (D1, D2, D3), las fuerzas de flotabilidad (B1, B2) y las masas que incluyen la masa añadida (m_1 , m_2). Las fuerzas que afectan al centro de masa de la base del robot, como las fuerzas de amortiguamiento (Dxcm, Dzcm), y la fuerza de flotabilidad (Bcm).

Figura 4.22. Diagrama de cuerpo libre para el cálculo de dinámico

Para hallar el modelo dinámico de la pierna cuando está en el proceso de elevación se usa el método de Newton-Euler (Dasgupta, 19998), (Silver, 1982), (Ardema, 2006), cuyas expresiones están definidas por las siguientes ecuaciones.

$$\sum F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (4.21)$$

$$\sum M = \frac{d(I\omega)}{dt} \quad (4.22)$$

Donde v_2 es la velocidad tangencial del fluido en la masa m_2 , v_1 es la velocidad tangencial del fluido en la masa m_1 .

$$(4.23)$$

$$\begin{aligned} \tau = \frac{d(I\dot{q})}{dt} + m_2 g d_2 \sin(q) + m_1 g l_1 \sin(q) - B_1 l_1 \sin(q) - B_2 d_2 \sin(q) \\ + D_2 v_2 |v_2| d_2 + D_1 v_1 |v_1| l_1 \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$F = (m_2 + m_2') \ddot{d}_2 - m_2 g \cos(q) + B_1 \cos(q) - (m_2 + m_2') d_2 \dot{q}^2 + D_3 \dot{d}_2 | \dot{d}_2 |$$

Donde v_2 es la velocidad tangencial del fluido en la masa m_2 , v_1 es la velocidad tangencial del fluido en la masa m_1 .

Se calcula el momento de inercia de la pierna de la siguiente manera

$$\frac{d(I\dot{q})}{dt} = \frac{d((m_2 d_2^2 + m_1 l_1^2) \dot{q})}{dt} \quad (4.25)$$

$$\frac{d(I\dot{q})}{dt} = 2m_2 \dot{d}_2 \dot{q} + ((m_2 + m_2') d_2^2 + ((m_1 + m_1') L_1^2) \ddot{q} \quad (4.26)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación 4.26 en la ecuación 4.23 obtenemos los siguiente

$$(4.27)$$

$$\begin{aligned} \tau = 2(m_2 + m_2') \dot{d}_2 \dot{q} + ((m_2 + m_2') d_2^2 + (m_1 + m_1') L_1^2) \ddot{q} + m_2 g d_2 \sin(q) \\ + m_1 g l_1 \sin(q) - B_1 l_1 \sin(q) - B_2 d_2 \sin(q) + D_2 v_2 |v_2| d_2 \\ + D_1 v_1 |v_1| l_1 \end{aligned}$$

Si expresamos la ecuación 4.27 y 4.24 en forma matricial obtenemos la siguiente expresión

(4.28)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} ((m_2 + m'_2)d_2^2 + (m_1 + m'_1)L_1^2) & 0 \\ 0 & (m_2 + m'_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 2(m_2 + m'_2)\dot{d}_2\dot{q} & 0 \\ 0 & (m_2 + m'_2)\dot{q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} D_2|\dot{q}|d_2^2 + D_1|\dot{q}|l_1^2 & 0 \\ 0 & D_3|\dot{d}_2| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} m_2gd_2\sin(q) + m_1gl_1\sin(q) - B_1l_1\sin(q) - B_2d_2\sin(q) \\ -m_2g\cos(q) + B_1\cos(q) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Dicha ecuación puede ser simplificada de la siguiente manera, y tendríamos la ecuación dinámica de la pierna en un entorno subacuático.

$$\begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + G \quad (4.29)$$

Donde M es la matriz de inercias que incluye la masa de cada eslabón y su masa añadida, C es la matriz de Coriolis que también se ve afectado por la masa añadida, D es la matriz de amortiguamiento debido al fluido, y G es la matriz de gravedad que también se ve afectada por la flotabilidad de los cuerpos.

Sin embargo, la expresión 4.29 solo describe la dinámica si la pierna del robot esta elevada y no en contacto con el suelo. Para poder determinar los torques y fuerzas generadas es necesario calcular las fuerzas de reacción (Fr) y multiplicar las por la matriz Jacobiana transpuesta (J^T) y restar la expresión con se muestra en la siguiente ecuación.

$$M \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + G = \begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} - J^T Fr \quad (4.30)$$

En la figura 4.23 se muestra el diagrama de cuerpo libre del robot para calcular las fuerzas de reacción en el pie, donde F_x y F_z son las fuerzas de reacción del pie en contacto, $\vec{r}$ es el vector desde el punto de contacto del pie al centro de masa de la base del robot. D_{xcm} es la fuerza de amortiguamiento en el eje X, D_{zcm} es la fuerza de amortiguamiento en eje Z producida por el fluido y B_{cm} es la fuerza de flotabilidad de la base de robot.

Figura 4.23. Diagrama de cuerpo libre para calcular las fuerzas de reacción

Resolviendo el problema mediante la teoría de Wrench (Davidson, 2004), obtendremos lo siguiente

$$\sum \mathcal{F}_r = \mathcal{F}_{r_{cm}} \quad (4.31)$$

$$\mathcal{F}_{1r} + \mathcal{F}_{2r} + \dots + \mathcal{F}_{nr} = \mathcal{F}_{r_{cm}} \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_1 \\ r_1 x \mu_1 \end{bmatrix} f_1 + \begin{bmatrix} \mu_2 \\ r_2 x \mu_2 \end{bmatrix} f_2 + \dots + \begin{bmatrix} \mu_n \\ r_n x \mu_n \end{bmatrix} f_n = \begin{bmatrix} F_{cm} \\ M_{cm} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Donde $f_1, f_2, \dots$, son las fuerzas de contacto de cada pierna correspondientemente, $r_1, r_2, \dots$, es el vector de cada una de las piernas desde su punto de contacto al centro de masa. F_{cm} es la fuerza aplicada en el centro de masa del robot y M_{cm} es el momento aplicado en el centro de masa. Convirtiendo este producto vectorial a producto matricial obtenemos que,

$$\begin{bmatrix} I \\ r_1 x \end{bmatrix} f_1 + \begin{bmatrix} I \\ r_2 x \end{bmatrix} f_2 + \dots + \begin{bmatrix} I \\ r_n x \end{bmatrix} f_n = \begin{bmatrix} F_{cm} \\ M_{cm} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Donde el vector $f = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ es el vector de fuerzas de cada pie, I es la matriz identidad, $r_1 x, r_2 x, \dots$, es el vector expresado en forma matricial mediante la matriz antisimétrica como se muestra en la siguiente ecuación.

$$r_1 x = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Finamente agrupando las fuerzas de contacto como la siguiente expresión;

$$\begin{bmatrix} I & I & \dots I \\ r_1 x & r_2 x & \dots r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{cm} \\ M_{cm} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Donde las fuerzas en el centro de masa se pueden igualar a la siguiente expresión

$$\begin{bmatrix} F_{cm} \\ M_{cm} \end{bmatrix} = M \vec{a} + D \vec{v} + G \quad (4.37)$$

Donde M es la matriz de masas e inercias incluyendo la masa añadida, D es la matriz de amortiguamiento, y G es la matriz de gravedad, resultado de las fuerzas de gravedad y flotabilidad. $\vec{a}$ es el vector de aceleraciones que puede ser medida con la IMU y $\vec{v}$ es el vector de velocidades que es medida con el sensor mecánico.

Igualando las ecuaciones 4.36 y 4.37 obtenemos los siguiente,

$$\begin{bmatrix} I & I & \dots I \\ r_1 x & r_2 x & \dots r_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = M \vec{a} + D \vec{v} + G \quad (4.38)$$

Denominamos a la matriz izquierda con la letra ζ

$$\zeta \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = M \vec{a} + D \vec{v} + G \quad (4.39)$$

Finalmente obtenemos las fuerzas de reacción mediante la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \zeta^{-1} [M \vec{a} + D \vec{v} + G] \quad (4.40)$$

Dependiendo del número de patas en contacto con el suelo, la anterior ecuación puede tener una o más soluciones, el criterio para reducir estas soluciones es usar la fuerza de fricción del suelo que estaría dada por la siguiente ecuación,

$$\sqrt{f_x + f_y} \leq \mu f_z, \quad (4.41)$$

Donde μ es el coeficiente de fricción del suelo. Por lo que la ecuación dinámica completa que incluye las fuerzas de contacto estaría dada por,

$$M \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{d}_2 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{d}_2 \end{bmatrix} + G = \begin{bmatrix} \tau \\ F \end{bmatrix} - J^T \zeta^{-1} [M \vec{a} + D \vec{v} + G] \quad (4.42)$$

4.5 Simulación

Para comprobar que los modelos matemáticos son correctos, se ha realizado un modelo de simulación multi-cuerpo en el software Matlab/Simulink. En la figura 4.24 se muestra un diagrama de flujo del proceso de simulación, el cual se inicia enviando la trayectoria del pie a ambos modelos y para después comparar los resultados.

Figura 4.24. Diagrama de flujo para la comprobación de los modelos

En la figura 4.25 se muestra el proceso de simulación con un paso por un periodo de 3 segundos. Las fuerzas hidrodinámicas también han sido incluidas en Simulink para poder simular que el robot se encuentra en un entorno subacuático.

Figura 4.25. Proceso de simulación de un paso

En la figura 4.26 se muestran los resultados de la cinemática inversa. Es apreciable la posición de cada uno de los actuadores de cada pierna: las líneas discontinuas son las obtenidas mediante la simulación y las líneas continuas, las conseguidas mediante los modelos matemáticos. La pierna 1 es la que no se eleva por esta razón, mientras que L1 es cero en casi toda la simulación y la pierna 2 es la que se eleva y genera el paso. Por ello, L2 muestra el desplazamiento del actuador. Todos los resultados muestran por tanto que el modelo matemático y simulador coinciden.

Figura 4.26. Posiciones de los actuadores

En la figura 4.27 se muestra los torques calculados por el simulador y los modelos matemáticos; podemos apreciar que los valores coinciden por lo que los modelos matemáticos describen bien el sistema dinámico. Es notable también que las fuerzas y torques de la pierna 1 son mayores que el de la pierna 2, debido a que la pierna 1 es la que hace contacto con el suelo y soporta el peso del robot.

Figura 4.27. Fuerzas y torques de los actuadores

En la figura 4.28 se muestran los resultados del cálculo analítico de las fuerzas de reacción de la pierna 1, que está en contacto con el suelo. Se puede apreciar que la fuerza incrementa paulatinamente en los primeros instantes cuando las dos piernas están en contacto y comparten la carga. Esto continua hasta encontrar un valor casi constante que es el periodo de duración del paso hasta que el otro pie entra en contacto. Además, se advierte que la fuerza de reacción en Z es mucho mayor que la fuerza en X, debido a que las fuerzas debido a la gravedad aún son mayores que las fuerzas de amortiguamiento del agua a la velocidad que se está moviendo.

En la figura 4.29 aparecen los resultados de la fuerza de reacción de la pierna 2. Ellos nos dicen que en los momentos iniciales el valor es cero, lo cual es razonable ya que esta pierna es la que genera el paso y está en elevación. Más tarde el valor comienza a incrementarse, ya que el paso está finalizando y entra en contacto con el suelo.

Figura 4.28. Fuerzas de reacción de la pierna 1

Figura 4.29. Fuerzas de reacción de la pierna 2

4.6 Conclusión

En este capítulo se ha descrito el proceso de ejecución del robot desde su concepción hasta su diseño y construcción. Se han desarrollado los experimentos necesarios con pequeñas vibraciones para hallar las constantes hidrodinámicas del robot, dando lugar a buenos resultados. De este modo, se ha podido determinar también la matriz de masa añadida del robot y ha sido posible describir su comportamiento hidrodinámico gracias a las pruebas con CFD. Además, el estudio ha obtenido la matriz de amortiguamiento del robot para entornos subacuáticos, la cual será de gran importancia para el cálculo dinámico y control del equipo. Calculada la cinemática y la dinámica inversa del robot, se ha demostrado finalmente mediante simulación que los modelos matemáticos describen bien el sistema.

Capítulo 5

Control para la locomoción estable

En este capítulo se proponen y desarrollan las estrategias de control para la locomoción estable del robot. Se plantean principalmente tres estrategias de control. La primera es el control para generar la trayectoria del centro de masa del robot. Para ello, se analiza un péndulo invertido en condiciones subacuáticas y se propone el punto de momento cero subacuático (U_{zmp}). Para controlar este modelo se desarrolla un control predictivo con el fin de generar la trayectoria del centro de masa. La segunda se desarrolla el sistema de control de posición de los actuadores, basándonos en una estrategia de control por compensación dinámica que permite controlar la posición del robot ante los cambios bruscos de carga por transición del contacto con el suelo en el proceso de caminado. Finalmente, también se propone una tercera estrategia de control para estabilizar el robot ante perturbaciones externas subacuáticas, de tal manera que, si una corriente del fluido impacta contra el robot, este reaccione buscando su estabilidad para no caer.

5.1 Punto de momento cero subacuático

Para encontrar el punto de momento cero subacuático (U_{zmp}) será necesario analizar un péndulo invertido en un entorno subacuático. En la figura 5.1 se muestra un diagrama de cuerpo libre del péndulo invertido cuya condición es que el péndulo se mueva de izquierda a derecha manteniendo su altura constante en Z, considerando de esta manera las velocidades y aceleraciones en el eje Z nulas. Se puede apreciar dos masas, una es m que es la masa inercial del cuerpo que se ve afectada tanto por la gravedad como por las aceleraciones, y la otra masa es la añadida, que depende de las características geométricas del cuerpo, el cual ya

han sido halladas en el capítulo anterior. Las fuerzas que le afectan a este péndulo son fuerzas verticales que son la gravitatoria (mg) y la de flotabilidad del cuerpo (B), y la fuerza horizontal que es la fuerza de amortiguamiento del agua (D), la cual depende de la velocidad relativa del fluido con el cuerpo y es el torque que se genera para crear el movimiento.

Figura.5.1. Péndulo invertido subacuático

Primero simplificamos las fuerzas verticales de tal manera que obtenemos lo siguiente (Fossen, 2002),

$$w_u = m g - \rho g V \quad (5.1)$$

Donde w_u es la fuerza resultante debido a la flotabilidad, g es la gravedad, ρ es la densidad del fluido, y V es el volumen del cuerpo. Despejando la gravedad y la masa obtenemos lo siguiente,

$$w_u = mg \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_i} \right) \right) \quad (5.2)$$

Donde ρ_i es la densidad del cuerpo. Podemos ver que existe una contante en la relación entre densidades, por lo que para simplificar la ecuación la llamaremos λ de tal manera que la fuerza resultante obtenida estaría determinada por la siguiente ecuación,

$$w_u = mg\lambda \quad (5.3)$$

El amortiguamiento hidrodinámico $D(v)$ depende de dos variables, una es el amortiguamiento lineal X_u y el otro es el amortiguamiento cuadrático $X_{u|u|}$, tal como se muestra en la siguiente ecuación (Antonelli, 2006), (Fossen y otros, 2002).

$$D(v) = X_u \dot{x} + X_{u|u|} |\dot{x}| \dot{x} \quad (5.4)$$

Donde $\dot{x}$ es la velocidad del centro de masa, X_u es la constante de amortiguamiento lineal y $X_{u|u|}$ es la constante de amortiguamiento cuadrático.

Aplicando la suma de momentos en el péndulo, obtenemos la siguiente ecuación,

$$mg\lambda x + z(X_{u|u|} |\dot{x}| + X_u) \dot{x} - z(m' + m) \ddot{x} - \tau = 0 \quad (5.5)$$

Despejando $\ddot{x}$, obtenemos la ecuación del péndulo invertido subacuático,

$$\ddot{x} = \frac{mg\lambda x}{z(m' + m)} + \frac{(X_{u|u|} |\dot{x}| + X_u) \dot{x}}{(m' + m)} - \frac{\tau}{z(m' + m)} \quad (5.6)$$

Donde $\ddot{x}$ es la aceleración del centro de masa, $\dot{x}$ es su velocidad y x su posición, m es la masa del péndulo, z es su altura, m' es la masa añadida, $X_{u|u|}$ es la constante del amortiguamiento cuadrático, y X_u es la constante del amortiguamiento lineal y τ es el torque generado en el punto de soporte.

El torque generado en el péndulo invertido subacuático debería ser igual al torque generado por las fuerzas verticales y el punto de momento cero subacuático (U_{ZMP}), como se muestra en la siguiente ecuación,

$$\tau - (mg\lambda)U_{ZMP} = 0, \quad (5.7)$$

Por lo que, reemplazando la ecuación 5.6 en la ecuación 5.7, obtendremos la ecuación del punto del momento cero subacuático.

$$U_{ZMP} = x + \frac{z(X_{u|u|} |\dot{x}| + X_u) \dot{x}}{mg\lambda} - \frac{z(m + m') \ddot{x}}{mg\lambda} \quad (5.8)$$

Como se puede apreciar la ecuación del punto de momento cero subacuático, difiere mucho y es más complejo que el ya conocido punto de momento cero (zmp) utilizado para robots terrestres. En principio en esta ecuación no desaparece la masa, lo cual lo hace dependiente, y debido a que la flotabilidad disminuye la fuerza vertical y la masa añadida aumenta la fuerza horizontal, las aceleraciones y velocidades del centro de masa deben de ser bajas para mantener el equilibrio, Por otra parte, también se puede apreciar que, para que el centro de masa coincida con el U_{ZMP} , la velocidad y las aceleraciones deberían ser nulas.

5.2 Control Predictivo

Para generar la trayectoria del centro de masa usaremos el método de Kajita (Kajita y otros, 2003), (Kajita y otros, 2006), el cual se basa en el uso de un controlador predictivo (MPC). Para esto es necesario linealizar la ecuación del punto de momento cero subacuático (ecuación 5.8) mediante la aproximación de Taylor (Montoro, 1996), obteniendo la siguiente ecuación,

$$U_{ZMP} = x + \frac{z(2X_u|u|\dot{x}|_0 + X_u)\dot{x}}{mg\lambda} - \frac{z(m+m')\ddot{x}}{mg\lambda} \quad (5.9)$$

Donde $|\dot{x}|_0$ es la velocidad del centro de masa a la que se linealiza el sistema.

Vamos a definir una nueva variable u_x como la salida de la ecuación (5.9)

$$\frac{d\ddot{x}}{dt} = u_x \quad (5.10)$$

Y definimos el espacio de estado del sistema

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (5.11)$$

Para la matriz de salida es necesario usar la ecuación de punto de momento cero subacuático lineal (ecuación 5.9),

$$\begin{bmatrix} U_{zmp} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{z(2X_u|u|\dot{x}|_0 + X_u)}{mg\lambda} & \frac{-z(m+m')}{mg\lambda} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

De esta manera es posible obtener como salidas las variables U_{zmp} , x , and $\dot{x}$. Finalmente se usará un controlador predictivo (MPC) y la posición del centro de masa y su velocidad serán obtenidas, tal como se muestra en la figura 5.2

Figure 5.2 Control Predictivo (MPC)

En la figura 5.3 se observa la salida del controlador (a) que viene a ser la derivada de la aceleración, esta salida se produce al generar un paso como se observa en (b), se puede

apreciar que la salida logra alcanzar la referencia, y con anterioridad, debido a que es función del MPC anticiparse a la referencia.

En la figura 5.4 se muestran los resultados obtenidos ante una referencia de U_{zmp} de 0.5 metros, se puede apreciar que la posición se anticipa a la referencia dándonos un resultado más natural del movimiento del centro de masa. Como se observa en la velocidad este inicia aumentandola y luego baja paulatinamente hasta que el centro de masa llegue a la referencia. De la misma manera se muestra en la aceleración que los primeros instantes este acelera y luego comienza a desacelerar.

Figura 5.3 a) salida del controlador b) referencia del U_{zmp}

Figura 5.4. Resultados de la posición, velocidad y aceleración del centro de masa

En la figura 5.5 se muestra el movimiento que representa los resultados, el robot inicia posicionando su pie en la referencia de $Uzmp$, mientras mueve su centro de masa a la velocidad que se muestra en la figura 5.4. después de la transición de punto de doble contacto con el suelo el centro de masa alcanza a posición de referencia de $Uzmp$.

Figura 5.5. Movimiento del centro de masa

5.3 Control de Posición

Debido a que, en el proceso de caminado, las piernas cambian de estado constantemente pasando de cargas sin contacto en el proceso de elevación de la pierna, a cargas con contacto con el suelo en el proceso de transición del cuerpo, un controlador PI (proporcional-integrativo) no puede hacerlo solo ya que los cambios de carga son muy grandes y es necesario compensar este cambio (Ogata, 2010), (Jelali, 2012), (Konami, 2016), sumando el controlador con la dinámica del robot. La ley de control de control para esta estrategia se puede expresar de la siguiente manera,

$$\tau = K_p(\hat{q}) + K_i \left(\int_0^t \hat{q} \right) + K_s (M(\ddot{q}) + C(\dot{q}) + D(\dot{q}) + G + J^T Fr) \quad (5.13)$$

Donde K_p y K_i son las constantes del controlador PI (proporcional-integrativo), $\hat{q}$ es el error de posición de los actuadores con respecto a la referencia y K_s es la constante proporcional de la servoválvula y esta multiplica a toda a ecuación dinámica del robot.

En la figura 5.6 se muestra el esquema de la estrategia de control de posición de los actuadores del robot. Este modelo empieza calculando la trayectoria del centro de masa mediante el control predictivo (MPC) (Diehl, 2010), (Moritz y otros, 2010), (Ling, 2008), explicado en el anterior ítem, después se calcula las posiciones de los actuadores mediante el uso de la cinemática inversa, obteniendo de esta manera las referencias de posición para el controlador. Se calcula el error de posición mediante la resta de la referencia con la posición medida del actuador, este error ingresa en el controlador PI (Astrom y otros, 2005), (Johnson, 2005), (Knospe, 2006). Por otro lado se calcula los torques generados mediante la ecuación dinámica sin contacto, y se calcula las fuerzas de reacción de la pierna y esta se multiplica por la matriz Jacobiana transpuesta (J^T), obteniendo los torques generados por el contacto con el suelo, estos torques se multiplican por el valor booleano del sensor de contacto de pie, que puede ser 0 o 1, de tal manera que si el pie está en contacto con el suelo el valor será uno, y los torque de contacto se sumaran a la dinámica del robot, sin embargo si el pie está elevándose el valor será cero, y los torques de contacto no sumaran a la ecuación dinámica. Una vez obtenida el torque generado por el proceso de caminado este se multiplica por la constante de la servoválvula K_s (Merriitt, 1991), (Jelali, 2012), (McCloy, 1989), (Sivaselvan y otros, 2008), que convierte los valores de torque en voltaje, y se suma a la salida del controlados PI.

Figura 5.6. Estrategia de control de posición de los actuadores

5.4 Control para recuperar el balance

Debido a las características del fluido, el entorno submarino siempre está en movimiento y esto puede causar el desequilibrio de robot y producir su caída. Por esta razón en esta sección se plantea una estrategia de control que le permita al robot reaccionar a tiempo ante una perturbación del fluido y generar un paso de tal manera que el robot se encuentre en una posición estable. En la figura 5.7 se muestra un esquema simplificado del péndulo invertido, la cual está siendo perturbado en su centro de masa por la velocidad del fluido V . La fuerza que ejerce el fluido genera un momento en el punto de apoyo del péndulo. Si el robot no reaccionase este momento, produciría que este cayera. Para evitar esto, hay que trasladar el U_{zmp} a un punto que equilibre el momento generado por la fuerza horizontal del fluido

Figura 5.7. Desplazamiento del U_{zmp}

Para calcular este desplazamiento, al cual llamamos U_{zmp} auxiliar, el momento generado por este debe de ser igual al momento generado por la fuerza del fluido, lo cual lo expresamos de la siguiente manera,

$$(U_{zmp_{aux}}) F_z = z F_x \quad (5.14)$$

$$(U_{zmp_{aux}}) mg\lambda = z(X_{u|u|}|v| + X_u)v \quad (5.15)$$

Despejando el $U_{zmp_{aux}}$ (punto de momento cero auxiliar), obtenemos lo siguiente,

$$U_{zmp_{aux}} = \frac{z(X_{u|u|}|v| + X_u)v}{mg\lambda} \quad (5.16)$$

Donde v es la velocidad del fluido, el cual es medido por el sensor mecánico del robot.

En la figura 5.8 se muestra la estrategia de control usado para recurrar el balance del robot ante una perturbación externa. Cuando se produce una perturbación del fluido, el sensor mecánico mide la velocidad del fluido, con este valor se calcula el $U_{zmp_{aux}}$, como este valor es transitorio, se calcula el valor máximo en un periodo de 0.5 segundos, con esto se genera una referencia que suma al U_{zmp} . El control predictivo genera la trayectoria del centro de masa y el control de posición genera el paso que reacciona ante la perturbación, llevando al robot al su punto de equilibrio

Figura 5.8 Estrategia de control para la recuperación del balance

5.5 Simulación

Para poder demostrar los conceptos teóricos, se ha realizado una simulación dinámica en el software Matlab/Simulink, tal como se observa en la figura 5.9 el diagrama de bloques diseñado en Simulink, el primer bloque es el generador de trayectoria, en el cual se encuentra el control predictivo para generar la trayectoria del centro de masa y posteriormente mediante la cinemática inversa genera las posiciones de los actuadores. Una vez generado las posiciones este pasa por el control de posición, como se observa en la figura los controladores PI más la compensación dinámica, estos generan los torques que van al modelo dinámico del robot, el cual es el bloque llamado “modelo del robot”, en este se simula el ambiente subacuático para la simulación.

Figura 5.9 Esquema en Matlab/simulink, para la simulación

El primer experimento que se ha realizado es el de caminado dinámico por un periodo de 100 segundos. En la figura 5.10 se puede observar una serie fotográfica del proceso de caminando por el periodo de 100 segundos. La serie fotográfica nos da una idea del desplazamiento del robot en el entorno subacuático simulado.

Figura 5.10 Secuencia fotográfica del proceso de simulación de caminado

En la figura 5.11 se muestra la referencia del $Uzmp$ (línea azul) que se ingresa en el controlador predictivo de manera que este, mediante el modelo de péndulo invertido subacuático, genera la trayectoria del centro de masa (línea naranja), consiguiendo que el robot llegue a desplazarse 0.85 m.

Figura 5.11 Desplazamiento del centro de masa

El controlador también genera la velocidad del centro de masa y a partir de esta se calculan también sus aceleraciones. En la figura 5.12 se muestra la velocidad del centro de masa (línea azul), que sube y baja paulatinamente en cada paso como se observa en la aceleración. El controlador acelera y desacelera constantemente para mantener el equilibrio de los momentos resultantes aplicados por las fuerzas dinámica y estáticas que afectan al robot.

Figura 5.12 Velocidad y aceleración del centro de masa

Para poder visualizar el equilibrio del sistema en el proceso de caminado, se ha realizado dos retratos de fase de los actuadores Q1 y Q2, que son los que generan el ángulo de inclinación del péndulo invertido. En la 5.13 se muestra el retrato de fase de Q1 (a) y Q2 (b), en los cuales se puede observar que las líneas son continuas y giran alrededor de un eje, demostrando el equilibrio del sistema de péndulo invertido en el proceso de caminado.

Figura 5.13 Retrato de fase

En la figura 5.14 se muestra las posiciones de cada uno de los actuadores, cuyas líneas continuas son las posiciones de referencia generadas por la cinemática inversa, y las líneas discontinuas son las posiciones medidas en cada actuador con los sensores. Se puede apreciar que el error es mínimo y que el control de posición implementado funciona bien en todo el proceso de caminado del robot.

Figura 5.14 Posiciones de los actuadores

En la figura 5.15 se muestra las fuerzas y torques generados por cada uno de los actuadores. Se puede apreciar la diferencia de cargas a lo largo del proceso de caminado, si se observa las fuerzas generadas por los actuadores, se puede ver que en el momento en el que la pierna se encuentra en contacto con el suelo la fuerza sube hasta aproximadamente 20 N, sin embargo, cuando pasa al estado de elevación sin contacto con el suelo, las fuerzas disminuyen hasta 5 N aproximadamente. De la misma manera se puede apreciar en los torques generados, cuando la pierna está en contacto con el suelo los torques suelen ser de hasta 1,5 Nm mientras que cuando la pierna está elevada sin contacto los torques bajan hasta 0,5 Nm. Esta diferencia de cargas en el proceso es la principal razón del uso del control por compensación dinámica.

Figura 5.15 Fuerzas y torques de los actuadores

En la figura 5.16 se muestra los cálculos de las fuerzas de amortiguamiento del fluido en los ejes X y Z, se puede apreciar que las fuerzas en el eje X, es más constante en el tiempo y llegan hasta valores de 0.6 N, esta variación depende mucho de la velocidad en el eje X en el centro de masa. Por otra parte, las fuerzas generadas en el eje Z son muy bajas a excepciones de ciertos momentos que es posible que se deba al instante en el que el pie hace contacto con el suelo, y genera vibraciones en el eje produciendo estas fuerzas de amortiguamiento.

Figura 5.16 Fuerzas de amortiguamiento del fluido

El otro experimento realizado es la del control para recupera el balance, para esto se simuló una fuerza temporal aplicada en el centro de masa del robot, tal como se muestra en primera gráfica de la secuencia fotográfica de la figura 5.17. Se puede apreciar que la fuerza generada en a) produce un desbalance al robot, por lo que este reacciona y empieza a generar el paso como se observa en b), haciendo que el robot retroceda hasta alcanzar una posición estable como se muestra en c).

Figura 5.17 Experimento de reacción

En la figura 5.18 se muestra el U_{zmp} auxiliar generado por la ecuación 5.16, el cual genera la referencia del U_{zmp} , se puede observar que el valor es negativo, debido al sentido de velocidad del fluido y actuación de la fuerza, esto hace que el control predictivo genere una trayectoria del centro de masa (línea naranja) con valores negativos también, dándonos a indicar que el robot debe de retroceder.

Figura 5.18 Trayectoria generada del centro de masa

Una vez generado la trayectoria del centro de masa, la cinemática inversa genera las posiciones de cada actuador para que el robot retroceda. Tal como se observa en la figura 5.19.

Figura 5.19 Posición de los actuadores

5.6 Conclusión

En este capítulo se han desarrollado todos los modelos de control necesarios para una locomoción estable de un robot con patas en un entorno subacuático. Se ha propuesto el modelo de péndulo invertido subacuático y se ha podido determinar el punto de momento cero subacuático (*Uzmp*). Se utilizó un controlador predictivo para controlar el *Uzmp* y poder generar la trayectoria del centro de masa del robot. Los resultados de este generador han demostrado que se puede mantener la estabilidad del robot en el proceso de caminado dinámico generando las aceleraciones necesarias para mantener el equilibrio dinámico de los momentos generados por las fuerzas horizontales y verticales. También se ha propuesto un modelo de control de posición basado en el uso de un controlador PI más compensación dinámica, debido a los cambios de carga que adquiere cada pierna en la transición de los pasos en contacto con el suelo. En este caso, los resultados de la simulación comprueban que el modelo de control funciona y permite mantener la posición de los actuadores durante todo el proceso de caminado. Finalmente, también se propuso un modelo de control para recuperar la estabilidad del robot ante la presencia de cargas externas. Para ello se empleó el *Uzmp auxiliar*, un modelo que puede estimar el punto de equilibrio del robot mediante el cálculo de la velocidad del fluido. Estos últimos resultados explican que el robot reacciona ante una fuerza externa y retrocede buscando el equilibrio y una posición más estable.

Capítulo 6

Desarrollo de software

En este capítulo se describe el proceso de implementación de los métodos de control descritos en el capítulo anterior, para el software de control del robot bípedo planar. Como se ha explicado en el capítulo 4, se ha usado una C-Rio para el control de las servoválvulas por lo que el lenguaje de programación usado es gráfico usando LabView. Se tratan dos temas principalmente, la primera es la implementación del punto de momento cero subacuático, en donde se describe la programación del espacio de estados, el control predictivo, la cinemática y la dinámica inversa. Y el otro es la implementación del sistema de control de posición de los actuadores, en la cual se describe el modelo de control PI con compensación dinámica.

6.1 Implementación del punto de momento cero subacuático

El software inicia cargando las constantes del péndulo invertido subacuático, tal como se observa en la figura 6.1, en esta también se crean las matrices de espacio de estados para luego ser implementados en el control predictivo. Una vez calculadas las constantes, se crean las ecuaciones de espacio de estados como se observa en la figura 6.2 y se implementa el controlador predictivo (MPC), en la cual se ingresan el horizonte de predicción con un valor de 90 s y el horizonte de control con un valor de 20 s y de este controlador se obtiene la trayectoria del centro de masa y su velocidad. Además, se implementa la función de cicloide para la trayectoria del pie y la función de paso para la referencia del punto de momento cero subacuático.

Figura 6.1 Inicio de las constantes y las matrices del Uzmp

Figura 6.2 Control predictivo

Una vez calculada la posición del centro de masa y la posición de los pies del robot se calcula mediante un MathScript la cinemática inversa como se observa en la figura 6.3, obteniendo finalmente las posiciones, velocidades y aceleraciones de los actuadores del robot.

Figura 6.3 Cálculo de la cinemática inversa

Figura 6.4 Cálculo de la dinámica inversa

Con los valores de la cinemática inversa, se procede a calcular las fuerzas y torques de los actuadores mediante la dinámica inversa del robot, como se observa en la figura 6.4. Estos valores se guardan en una variable global para su posterior uso en el control de posición.

6.2 Implementación del control de posición

El control de posición inicia con la lectura de los sensores mediante el Arduino Due, como se observa en la figura 6.5. Se empieza leyendo el puerto serie a una velocidad de 115200 baudios, y obtiene los valores medidos de las posiciones de cada actuador, los sensores de contacto de cada pie, y las velocidades del fluido medidas por el sensor mecánico.

Figura 6.5 Lectura de los sensores

Posteriormente se procede a la lectura de la Crio, como se observa en la figura 6.6, se escanea los dos módulos analógicos implementados, y se procede a programarlo.

Figura 6.6 Lectura de la Crio

En la Crio, se empieza leyendo todas las variables globales del sistema, los cuales son la lectura de posiciones de referencia obtenidas por la cinemática inversa, la lectura de los sensores medidos por el Arduino DUE, que son las posiciones de los actuadores, los sensores de contacto y el sensor mecánico de velocidad relativa.

Figura 6.6 Lectura de las variables globales

Posteriormente se implementa el controlador PI, como se observa en la figura 6.7, con un rango de salida de -10 v a 10 v, y se utiliza un $K_p=0.04$, $K_i=300$, después se leen las variable globales de los torques y fuerzas calculadas con la dinámica inversa y se compensa la salida del controlador, pero antes este es multiplicado por la ganancia de la servoválvula $K_s=-0.15$, después se obtiene el voltaje de salida que se envía al módulo analógico para posteriormente ir al transformador de corriente y finalmente a la servoválvula.

Figura 6.7 Control de compensación dinámica

6.3 Conclusión

En este capítulo se ha descrito el proceso de implementación del sistema de control del robot bípedo planar. Como se ha podido ver, se ha implementado todos los conceptos matemáticos propuestos en los capítulos anteriores, desde la implementación del punto del momento cero subacuático hasta la implementación del sistema de control de posición. Se ha descrito las constantes usadas para cada controlador, como los valores de horizonte de predicción y el horizonte de control del controlador predictivo, también los valores de ganancia proporcional e integrativo de controlador PI y la ganancia proporcional de la servoválvula para la compensación dinámica de sistema de control.

Capítulo 7

Experimentación y resultados

En este capítulo se describe el proceso de experimentación del robot bípedo planar, para demostrar los fundamentos teóricos propuestos en esta investigación, para una locomoción estable de robots con patas en entornos subacuáticos. Se hace una descripción de los medios usados para el experimento y las características físicas del ambiente subacuático. Se propone dos experimentos, el primero es el de caminado dinámico, para demostrar la teoría de punto de momento cero subacuático y el control de posición propuesto, el segundo experimento es el de control para recuperar el balance, generándole al robot una perturbación del fluido para que reaccione y genere el paso para estabilizar su posición y no caiga. Finalmente se muestran los resultados obtenidos de los experimentos mencionados.

7.1 Descripción del experimento

Los experimentos fueron realizados en el laboratorio de hidroacústica de Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información “Leonardo Torres Quevedo” (ITEFI), en una piscina de cuyas dimensiones son, de largo 7.5m, ancho 4.5m y profundidad 4.5m. En la figura 7.1 se puede apreciar el laboratorio de experimentación, y se puede ver claramente la piscina (4), también se muestra el sistema de control del robot (1), que contiene, las servoválvulas, Crio, el colector de aceite y la fuente de tensión, este sistema se encontraba en todo momento fuera de la piscina. La presión hidráulica se transmitía mediante 8 mangueras hidráulicas de 6 metros de longitud (2) a cada actuador. Se puede observar también el robot bípedo planar, el cual cuenta con cadenas y sogas para sumergirlo dentro de la piscina.

Figura 7.1 Laboratorio de experimentación, 1) sistema de control del robot, 2) manguera hidráulica, 3) robot bípedo planar, 4) Piscina.

En la figura 7.2 se muestra el robot bípedo planar ya sumergido a una profundidad de 4.5 metros en la piscina, se puede observar la base fija, las mangueras hidráulicas que cuelgan desde la parte superior, el Arduino DUE, que trasmite las señales de los sensores al ordenador, y finalmente el robot bípedo.

Figura.7.2. Robot bípedo planar sumergido a 4.5 metros de profundidad

El método de experimentación se basó en dos tipos de experimentos, el primero con el objetivo de demostrar el caminado dinámico, con la teoría del punto de momento cero subacuático ($Uzpm$) y la estrategia de control, se realizó un proceso de caminado de 54 segundos. El segundo experimento se basó en la perturbación del fluido mediante una placa metálica de 30 x 30 cm de longitud, el cual produjo que el fluido se moviera generando perturbaciones del robot y que este actuara para que no caiga. Las constantes principales del robot usadas para este experimento, se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Valores de las constantes para la experimentación

Constantes	
z	0.7 m
$X_{u u }$	$134.4 \text{ N s}^2 / \text{m}^2$
X_u	$18.6 \text{ N s} / \text{m}$
$Z_{u u }$	$130.5 \text{ N s}^2 / \text{m}^2$
Z_u	$21.1 \text{ N s} / \text{m}$
g	9.8 m/s^2
λ	0.7
MPC	Control de predicción = 90, Horizonte de control = 20
$ \dot{x} _0$	0.02 m/s
μ	0.8
PI	Q1 (0.04, 300); Q2 (0.04, 300); L1 (0.05, 150); L2 (0.05, 150)
Ks	Q1 (-0.15); Q2 (-0.15); L1 (-0.1); L2 (-0.1)
K	120 N/m

7.2 Caminado dinámico

El experimento de caminado dinámico duró un periodo de 54 segundos, en la figura 7.3 se puede apreciar una serie fotográfica del proceso de caminado subacuático, durante todo el caminado el robot ha mantenido la estabilidad y no ha caído. En la figura 7.4 se muestra la trayectoria del centro de masa (línea roja) generado por el control predictivo mediante el punto de momento cero subacuático ($Uzmp$), se puede observar que el robot se desplaza aproximadamente 1,2 metros a una velocidad casi constante de 0.02 m/s, también se puede observar la trayectoria de cada pie en su respectivo eje, generado por la función cicloide implementada en el software.

Figura.7.3. Serie fotográfica del proceso de caminado dinámico

Figura.7.4. Desplazamiento del centro de masa

En la figura 7.5 se muestra los resultados de la posición de los actuadores de la pierna 1 del robot bípedo, las líneas azules son las posiciones de referencias generadas por la cinemática inversa y las líneas naranjas son las medidas con los sensores de posición de cada actuador. Se puede observar que los actuadores siguen la referencia con un error mínimo, esto nos indica que el control de posición implementado funciona.

Figura.7.5. Desplazamientos de los actuadores de la pierna 1

En la figura 7.6 se muestra los resultados de la posición de los actuadores de la pierna 2 del robot bípedo. Las líneas azules son las generadas por la cinemática inversa como referencia del sistema de control implementado, y las líneas color naranja, son las medidas por los sensores de posición de cada actuador. Se puede apreciar que los errores son mínimos y que el controlador cumple su función.

Figura.7.6. Desplazamientos de los actuadores de la pierna 2

En la figura 7.7 y 7.8 se muestra un diagrama de fase de los actuadores q_1 y q_2 . Se puede apreciar en ambas gráficas que las líneas siguen un movimiento circular alrededor de un eje, esto nos indica que el sistema está en equilibrio y que el modelo del péndulo invertido subacuático está manteniendo el equilibrio dinámico del proceso de caminado.

Figura.7.7. Diagrama de fase de la del actuador q_2

Figura.7.8. Diagrama de fase del actuador q_1

En la figura 7.9 se puede apreciar los torques y fuerzas calculadas de los actuadores de la pierna 1, se puede notar que las fuerzas inician en su mínimo valor, esto se debe a que la pierna 1 inicia generando el paso, elevando la pierna, evitando de esta manera no hacer contacto con el suelo por lo que las cargas dinámicas son las mínimas.

Figura.7.9. Torques y fuerzas de los actuadores de la pierna 1

En la figura 7.10 se muestra los torques y fuerzas de los actuadores de la pierna 2. Se puede apreciar que las fuerzas y torques inician en su valor máximo, esto es debido a que la pierna inicia en contacto con el suelo, posteriormente las cargas bajan en ese punto la pierna se encuentra en su proceso de elevación del suelo para generar el paso, como se ha visto en las simulaciones, las cargas varían cíclicamente, aumentando y disminuyendo bruscamente

Figura.7.10. Torques y fuerzas de los actuadores de la pierna 2

En la figura 7.11 se muestra los resultados de las velocidades relativas con respecto al fluido medidas con el sensor mecánico, se puede apreciar las tres velocidades en las tres direcciones espaciales, la de mayor valor es la de la V_x , ya que es la dirección en la que se mueve el robot, el valor medio de esta velocidad nos indica que el robot se mueve a una velocidad media de 0.02 m/s, se puede observar pequeñas oscilaciones en los valores de V_z y V_x , que es posible a que se deban a vibraciones en el proceso de caminado que a una velocidad de movimiento.

Figura.7.11. Velocidades relativas obtenidas por el sensor mecánico

7.3 Estabilización ante perturbaciones subacuáticas

Para este experimento se utilizó una placa metálica sujeta a una varilla. En la figura 7.12 se observa una serie fotográfica de este proceso, en la primera foto, se puede apreciar la placa metálica, el cual se produce una oscilación (en sentido de la flecha amarilla), este movimiento genera una onda del fluido que llega al robot que en principio esta estable, en la siguiente fotografía se observa que el movimiento del fluido desestabiliza el robot y este reacciona retrocediendo, buscando el equilibrio el cual lo logra en el segundo 5. Después se vuelve a generar otra perturbación y nuevamente el robot reacciona y retrocede, buscando el equilibrio.

Figura.7.12. Serie fotográfica del proceso de reacción para recuperar el balance

En la figura 7.13 se puede apreciar las velocidades relativas del fluido medidas con el sensor mecánico, la línea azul es la velocidad del fluido en el eje X, se puede ver claramente dos picos de velocidad, debido a que se ha generado dos perturbaciones con la placa metálica, la primera llegó a generar una velocidad de aproximadamente -0.15 m/s y la segunda y más prolongada de aproximadamente $-0,25 \text{ m/s}$, el sensor también a medido velocidades en el eje Y, de valores de 0.05 m/s y 0.06 m/s , y pequeñas oscilaciones en el eje Z.

Figura.7.13. Velocidades relativas obtenidas por el sensor mecánico

En la figura 7.14 se muestra el cálculo del punto de momento cero auxiliar ($U_{zmp\ aux}$), valor que se estima para el control estabilidad del robot, se puede apreciar que el algoritmo estima después de 0.5 segundos el valor máximo del $U_{zmp\ aux}$, en cada una de las perturbaciones, generando un valor de referencia que posteriormente se ingresa en el control predictivo para generar la trayectoria del centro de masa.

En la figura 7.15 se muestra la trayectoria del centro de masa generada a partir de la referencia del punto de momento cero subacuático auxiliar, se puede apreciar que su valor es negativo (línea azul), haciendo que el robot retroceda para estabilizarse, se muestra también la generación de las trayectorias de cada uno de los pies, mediante la ecuación de la función cicloide. Después de generar estas trayectorias, mediante la cinemática inversa el software calcula las posiciones de los actuadores y el sistema de control de posición activa los actuadores para que el robot retroceda.

Figura.7.14. Cálculo del Punto de momento cero auxiliar (Uzmp_aux)

Figura.7.15. Posición del centro de masa

En la figura 7.16 se muestra las posiciones generadas de los actuadores de la pierna 1, donde las líneas azules son las posiciones de referencia y las líneas color naranja son medidas por los sensores posición de cada actuador, se puede apreciar que las posiciones medidas siguen la referencia, pero a diferencia del proceso de caminado el error es un poco mayor y esto se debe a la perturbación generada por el fluido.

Figura.7.16. Posiciones de los actuadores de la pierna 1

En la figura 7.17 se muestra las posiciones de los actuadores de la pierna 2, se puede apreciar las posiciones de referencia (línea azul) y las posiciones medidas (línea naranja), nuevamente el controlador de posición logra el objetivo de seguir la referencia, sin embargo, como en el caso anterior el error es mucho mayor que en el proceso de caminado debido a la perturbación generada por la placa.

Figura.7.17. Posiciones de los actuadores de la pierna 2

7.4 Discusión

La figura 7.4 muestra la trayectoria generada por el Uzmp. La velocidad generada es muy baja para el caminado, aproximadamente como se muestra mediante la medida del sensor mecánico. Hay dos principales razones para las bajas velocidades obtenidas. La primera, como se puede ver en la ecuación del *Uzmp*, es que las fuerzas inerciales se incrementan debido a la masa añadida adquirida por el robot, la cual es bastante considerable como se ha demostrado en los experimentos. Por otro lado, la fuerza gravitacional disminuye debido a la flotabilidad del cuerpo. Esto hace que la velocidad de escape de péndulo sea muy baja, disminuyendo la máxima velocidad de caminado del robot y causando una transición a trote o salto. Este tipo de análisis para un robot con patas en un entorno terrestre es calculado con el número de Froude. De acuerdo con las investigaciones de Alexander (Alexander, 1984) en robots bípedos y cuadrúpedos, el caminado suele ser abandonado a valores de número de

Froude mayores que 0.5, por lo que de la misma manera debe hacerse un análisis del número de Froude para la locomoción en entornos submarinos. Esto aporta un mejor entendimiento de las máximas velocidades de caminado y su transición de estados en la locomoción, los cuales deberían depender de las constantes hidrodinámicas, tales como la masa añadida y la flotabilidad.

La velocidad de caminado también se ve limitada debido a las fuerzas de reacción en el suelo. Debido a la flotabilidad, la fuerza en la dirección Z del pie disminuye reduciendo el límite de fuerza de reacción. Para prevenir que el robot deslice, la fuerza de reacción en el plano debe de ser mayor a la fuerza generada por el amortiguamiento hidrodinámico, el cual depende de las constantes hidrodinámicas y la velocidad del robot. Igualando esta ecuación con la ecuación de la fuerza de fricción obtenemos lo siguiente,

$$X_u \dot{x} + X_{u|u|} |\dot{x}| \dot{x} \leq \mu (mg\lambda). \quad (7.1)$$

Resolviendo esta inecuación para nuestro robot planar obtenemos que la velocidad del centro de masa debería ser $\dot{x} \leq 0.3 \text{ m/s}$. A velocidad mayores a este límite el robot empezaría a deslizarse. Obviamente, este es un valor bastante teórico, pero todavía es muy bajo. En el experimento real la velocidad obtenida fue de 0.02 m/s , donde el robot no presentó deslizamiento. Al incrementar esta velocidad el robot empezaba a presentar deslizamiento en ciertas zonas del proceso de caminado. Para mejorar este límite de velocidad las constantes hidrodinámicas deberían ser reducidas con mejores diseños hidrodinámicos.

Respecto al *Uzmp* propuesto, los resultados demuestran que este genera la trayectoria, con las aceleraciones necesarias para mantener el equilibrio dinámico en el proceso de caminado. Se ha visto la gran importancia de las constantes hidrodinámicas que no pueden ser depreciadas, porque sus valores son relativamente grandes, como el de la masa añadida que prácticamente duplica la masa total del robot. El *Uzmp auxiliar* ha logrado generar la referencia para absorber la fuerza hidrodinámica del fluido, causando que el robot retroceda para recuperar el balance. En cuanto a la absorción de fuerzas externas para los robots con patas, existen diferentes propuestas, pero estos métodos se basan principalmente en la medida de las aceleraciones del centro de masa del robot. Esta medida se hace en robots terrestres ya que es difícil estimar la fuerza de perturbación antes que afecte al cuerpo. Sin embargo, el método propuesto en esta tesis estima la fuerza midiendo la velocidad del fluido y puede ser medido con el sensor mecánico que se ha desarrollado o por otro sensor más avanzado que incluso podría estimar la velocidad del fluido antes que afecte al robot, tales como los sensores de efecto Doppler. Esto debería permitir generar la referencia del paso antes que la perturbación del fluido afecte al robot, permitiéndole reaccionar más rápido.

Capítulo 8

Conclusiones

- Se ha logrado diseñar y construir un sensor mecánico basado en un mecanismo paralelo para medir la velocidad relativa del fluido. Se han desarrollado los modelos matemáticos y el algoritmo para su funcionamiento, se ha podido analizar el comportamiento del sensor mediante un estudio de simulación dinámica y se ha demostrado con los experimentos realizados con el prototipo que el sensor es capaz de medir la velocidad del fluido en los tres ejes; con coeficientes de determinación mayores al 90 % y errores relativos menores al 10 %.
- Se ha logrado diseñar y construir el robot bípedo planar subacuático, dimensionando los actuadores y describiendo la arquitectura de control del robot. Los mecanismos planteados por el diseño han sido útiles y simples para cumplir con el objetivo. El uso de tecnologías hidráulicamente actuados ha sido de gran utilidad para su funcionamiento en el fondo subacuático ya que no se ven afectadas. Las estrategias de medir la posición de los actuadores con sensores poco convencionales, pero sin embargo fáciles de poder impermeabilizar, han funcionado y cumplido con sus objetivos. Se han calculado las constantes hidrodinámicas como masa añadida y coeficientes de amortiguamiento mediante experimentos físicos y computacionales y, finalmente, el robot ha podido funcionar sin ningún problema a 4.5 metros de profundidad, con los diversos experimentos planteados en esta tesis.

- Se ha desarrollado la cinemática inversa del robot para generar las posiciones de los actuadores y se ha podido determinar la matriz Jacobiana de la pierna del robot. Se ha calculado la dinámica del robot en un entorno subacuático, teniendo en cuenta las fuerzas hidrodinámicas que se generan al desplazarse en el fluido. Se ha modelado la ecuación dinámica para estimar las fuerzas de reacción de las piernas del robot y calcular las cargas adicionales por contacto con el suelo. Los modelos han sido corroborados mediante simulación computacional multi-cuerpo y los resultados han demostrado que los modelos describen el comportamiento cinemático y dinámico del robot.
- Se han implementado las estrategias de control para una locomoción estable en un entorno subacuático. Se ha determinado la ecuación de punto de momento cero subacuático y su estrategia de control basado en un control predictivo, para generar la trayectoria del centro de masa, de tal manera que el robot puede caminar estable. Se ha planteado la estrategia de control de posición por compensación dinámica para el control de los actuadores y finalmente se ha propuesto un modelo de control para que el robot reaccione ante perturbaciones y recupere la estabilidad. Este modelo de control se basó en el planteamiento del punto de momento cero subacuático auxiliar, que actúa como referencia para generar la trayectoria del centro de masa. Los modelos planteados fueron probados mediante la simulación computacional multi-cuerpo y posteriormente mediante el experimento físico del robot.
- Se ha desarrollado el software de control del robot bípedo planar, implementando las estrategias de control planteadas en esta tesis. Dicho software fue programado en LabView y mediante este se ha podido extraer los datos de experimentación.
- Se han realizado los experimentos de locomoción subacuática con el robot bípedo planar a una profundidad de 4.5 metros. En concreto, se han llevado a cabo dos ensayos. El primero de caminado dinámico por un periodo 54 segundo, cuyos resultados han demostrado que la estrategia de control basada en el punto de momento cero subacuático funciona y mantiene estable el robot en el proceso de caminado. También se ha demostrado el funcionamiento del control de posición por compensación dinámica, permitiendo controlar los actuadores y generar la trayectoria que deseamos tener para el caminado. El segundo experimento consistió en generar una perturbación para que el robot cayese, demostrando que el robot es capaz de reaccionar y retroceder para recuperar su estabilidad y no precipitarse, gracias a la estrategia de control basada en el punto de momento cero auxiliar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agrawal, A.; Prasad, B., Viswanathan, V., Panda, S.K., (2013). *Dynamic modeling of variable ballast tank for spherical underwater robot*. In Proceedings of the International Conference on Industrial Technology, Cape Town.
2. Alexander, R.The,(1984). *Gaits of bipedal and quadrupedal animals*. The International Journal of Robotics Research, vol. 3, no 2, p. 49-59.
3. Alvarado, J.G, Agundis, A.R., Garduño, H.R, Ramírez, B.A, (2010). *Kinematics of an asymmetrical three-legged parallel manipulator by means of the screw theory*. Mech. Mach. Theory, 45, 1013–1023.
4. An, H.S., Lee, J.H., Lee, C., Seo, T.W., Lee, J.W, (2017). *Geometrical kinematic solution of serial spatial manipulators using screw theory*. Mech. Mach. Theory, 116, 404–418.
5. Antman, S.S., Osborn, J.E, (1979). *The principle of virtual work and integral laws of motion*. Arch. Ration. Mech. Anal.69, 231–262.
6. Antonelli, G. (2006). *Underwater Robots*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
7. Antonelli, Gianluca, (2014.). *Underwater robots*. Vol. 3. Switzerland: Springer International Publishing.
8. Ardema, Mark D. (2006). *Newton-Euler Dynamics*. Springer Science & Business Media.
9. Astrom, Karl Johan; Hägglund, Tore. (2009). *Control PID avanzado*. Pearson, Madrid.
10. B. H. Jun, (2012). *Preliminary design of the multi-legged underwater walking robot CR200*, Oceans - Yeosu, Yeosu, pp. 1-4.
11. B. Jun, (2013). *Development of seabed walking robot CR200*, MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, 2013, pp. 1-5.
12. B. Kim, H. Shim, B. Jun and P. Lee. (2014). *Inter-program communication protocol for operation of six-legged subsea walking robot CR200*, Oceans - St. John's, St. John's, NL, pp. 1-4.

13. B.M., Fredsoe, J. (1997). *Hydrodynamics around Cylindrical Structures*, World Scientific Publishing: Singapore.
14. C. Jing, (2013). *Human-Simulated Predictive Control of Variable ZMP Trajectory Tracking for Biped Robot*, International Conference on Information Technology and Applications, Chengdu, pp. 466-470.
15. C. Tang, F. Xu and F. Zou, (2017). *A Stable Trot Strategy of Quadruped Robot Based on Capture Point*, IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Honolulu, pp. 427-431
16. Calisti, Marcello; Laschi, Cecilia. (2015). *Underwater running on uneven terrain*. in oceans 2015-Genova. IEEE,p. 1-5.
17. Carbone, G., Ceccarelli, M. (2005). *Legged robotic systems*. In *Cutting Edge Robotics*; Kordic, V., Lazinica, A., Merdan, M., Eds., InTech: Vienna, Austria, pp. 553–576.
18. Chavez-Clemente, D. (2011). *Gait Optimization for Multi-legged Walking Robots, with Application to a Lunar Hexapod*. Ph.D. Thesis, Stanford University, California, CA, USA.
19. Chevallereau, C., Abba, G., Aoustin, Y, Plestan, F., Westervelt, E., Wit, C., Grizzle, (2003). *J. Rabbit: A testbed for advanced control theory*.
20. Christ, Robert D., Robert L. Wernli Sr. (2013). *The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles*. Butterworth-Heinemann.
21. D. Nyce. (2004). *Linear position sensors: theory and application*, John Wiley & Sons.
22. D. Paret, and C. Fenger. (1997). *The I2C bus: from theory to practice*, John Wiley & Sons.
23. Dasgupta, Bhaskar; Mruthyunjaya, T. S. A. (1998). *Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator*. Mechanism and machine theory, vol. 33, no 8, p. 1135-1152.
24. Davidson, J.; Hunt, K. (2002). *Robots and Screw Theory*; Oxford University Press: Oxford, UK.
25. Davidson, Joseph K.; Hunt, Kenneth H.; Pennock, Gordon R. (2004). *Robots and screw theory: applications of kinematics and statics to robotics*. J. Mech. Des., vol. 126, no 4, p. 763-764.

26. Diehl, Moritz; Amrit, Rishi; Rawlings, James B. A. (2010). *Lyapunov function for economic optimizing model predictive control*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no 3, p. 703-707.
27. Du, Xiaolong. (2016). *Energy consumption analysis in multi-legged robots based on gait planning*. 35th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, p. 6183-6188.
28. Ejarque Rinaldini, Gonzalo. (2016). *Design and Control of a Transformable Anthropoid Robot for Underwater Works*. Diss. Industriales.
29. Eldredge, Niles. (2002). *Life on Earth*, AG. ABC-CLIO.
30. Eng, Y., Lau, W., Low, E. (2008). *Identification of the hydrodynamics coefficients of an underwater vehicle using free decay pendulum motion*. International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists.
31. Esser, Patrick. (2009). *IMU: inertial sensing of vertical CoM movement*. Journal of biomechanics 42.10 ,1578-1581.
32. Featherstone, R. (2008). *Rigid Body Dynamics Algorithms*, Springer: Sydney, Australia.
33. Fernando, Y.Jeon. (2016). *Potential anti-inflammatory natural products from marine algae*. Environmental Toxicology and Pharmacology, 48, 22–30.
34. Fossen, Thor I. (2002). *Marine control system-guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*.
35. Franz, Z. (2012). *Mechanics of Solids and Fluids*, Springer, New York, NY, USA, pp. 225–256.
36. Fu, K, Gonzalez, R., Lee, C. (1989). *ROBOTICS: Control, Sensing, Visión, and Intelligence*, 1st ed., McGraw-Hill Education: New York, NY, USA.
37. Giacomo Picardi, Cecilia Laschi, Marcello Calisti. (2018). *Model-based open loop control of a multigait legged underwater robot*, *Mechatronics*, Volume 55, Pages 162-170.
38. Gonzalo Emmanuel Ejarque Rinaldini, Roque Jacinto Saltaren Pazmiño, Gabriel Armando Poletti Ruiz, Rafael Aracil Santonja. (2014). *Dispositivo y método para la medición de corrientes de fluidos mediante mecanismo paralelo esférico actuado por fuerzas de arrastre*. ES. Patent no. ES2525394B2.
39. Gupta, Ram S. (2016). *Hydrology and hydraulic systems*. Waveland Press.

40. H. Lee and J. Lee. (2017). *Hardware design and swimming strategy for stable pitch motion of underwater robot: CALEB10*, 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Kanazawa, pp. 1326-133.
41. Haitao Yu, Haibo Gao, Zeyang Fan, Zongquan Deng and Lixian Zhang.(2017). *Dual-SLIP model based galloping gait control for quadruped robot: A Task-space Formulation*, American Control Conference (ACC), Seattle, WA, pp. 191-197.
42. Havoutis, J. Ortiz, S. Bazeille, V. Barasuol, C. Semini, (2013). *Onboard perception-based trotting and walking with the hydraulic quadruped robot (HyQ)*, The IEEE international conference on intelligent robots and systems, pp. 6052-6057.
43. Heejoong Kim, Jihong Lee,Design.(2017). *Swimming motion planning and implementation of a legged underwater robot (CALEB10: D.BeeBot) by biomimetic approach*,Ocean Engineering,Volume 130,pp. 310-327.
44. J. P. Ferreira, M. Crisostomo and A. P. Coimbra. (2009). *Human-like ZMP trajectory reference in sagittal plane for a biped robot*, International Conference on Advanced Robotics, Munich, pp. 1-6.
45. J. Seo, J. Cho, B. Park, J. Kim and S. Park. (2014). *Leg mechanism design for SLIP model of hydraulic quadruped robot*, 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Kuala Lumpur, pp. 461-466.
46. Jelali, M., & Kroll, A. (2012). *Hydraulic servo-systems: modelling, identification and control*. Springer Science & Business Media.
47. Johnson, Michael A.; Moradi, Mohammad H. (2005). *PID control*. Springer-Verlag London Limited.
48. K. Lee, E. Lee. (2016). *Sustainable production of bioethanol from renewable brown algae biomass*. Biomass and Bioenergy, 92, 70–75.
49. K. Stephan. (2015). *Analog and mixed-signal electronics*. John Wiley & Sons.
50. Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K.,Hirukawa, H. (2003). *Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point*, International Conference on Robotics and Automation, pp:1620-1626.
51. kajita, Shuuji. (2006). *Biped walking pattern generator allowing auxiliary zmp control*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, pp: 2993-2999.

52. Kajita, Shuuji. (2014). *Introduction to humanoid robotics*. Springer Berlin Heidelberg.
53. Kanatani, K. (2015). *Understanding Geometric Algebra*, Japan; CRC Press: New York, NY, USA.
54. Khalil, W., Ibrahim, O. (2007). *General solution for the dynamic modeling of parallel robots*. J. Intell. Robot. Syst., 49, 19–37.
55. Knospe, Carl. (2006). *PID control*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 26, no 1, pp. 30-31.
56. Konami, S.; Nishiumi, T. (2016). *Hydraulic Control Systems*, World Scientific Publishing Company.
57. Korotkin, A. I. (2008). *Added masses of ship structures*, Springer Science & Business Media.
58. LEI, Jingtao. (2014). *Energy efficiency analysis of quadruped robot with trot gait and combined cycloid foot trajectory*. Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 27, no 1, pp. 138-145.
59. Ling, Keck-Voon, Wu, Bing Fang; Maciejowski, J. M. (2008). *Embedded model predictive control (MPC) using a FPGA*. IFAC Proceedings Volumes, vol. 41, no 2, p. 15250-15255.
60. Liu, Hongyi, Song, Weigang; Peng, Zhaoxing.(1994). *Foot movement control of walking machines modified by means of composite cycloid method*. Robot, vol. 16, no 6, pp. 350-6.
61. M. Liu, F. Xu, K. Jia, Q. Yang and C. Tang. (2016). *A Stable Walking Strategy of Quadruped Robot Based on Foot Trajectory Planning*, 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Beijing, pp. 799-803.
62. M. Raibert, K. Blankspoor, G. Nelson, R. Playter. (2008). *Bigdog the rough-terrain quadruped robot [C]*, Proceedings of 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, pp. 10822-10825.
63. Martínez, M.R.; Alici, G. (2006). *Kinematics and singularity analyses of a 4-dof parallel manipulator using screw theory*. Mech. Mach. Theory, 41, 1048–1061.
64. McCloy, Donaldson; Martin, Hugh Robert. (1980). *Control of fluid power: analysis and design*. Chichester, Sussex, England, Ellis Horwood, Ltd.; New York, Halsted Press. 505.

65. Merritt, Herbert E. (1991). *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons.
66. Mikhailov, M.D., Silva Freire, A.P. (2013). *The drag coefficient of a sphere: An approximation using Shanks transform*. Powder Technol, 237, 432–435.
67. Montoro López, Gabriel. (1996). *Contribución al estudio y desarrollo de técnicas de control aplicadas a la linealización de sistemas*. Universitat Politècnica de Catalunya.
68. Moreno, Héctor A. (2014). *Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11.1.pp:3-19.
69. Moritz, AMRIT, Rishi, Rawlings, James B. A. (2010). *Lyapunov function for economic optimizing model predictive control*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no 3, pp. 703-707.
70. Morrison, A.; Yoerger, D. (1993). *Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, nonuniform, 1-dimensional translation*, Proceedings of OCEANS, pp. II277.
71. Mott, R.L. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada*; Pearson Educación: Naucalpan de Juárez, Mexico.
72. Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*, 5th ed.; Pearson Educación: Madrid, Spain.
73. R. Saltaren, A. R. Barroso and O. Yakrangi. (2018). *Robotics for Seabed Teleoperation: Part-I–Conception and Practical Implementation of a Hybrid Seabed Robot*, in IEEE Access, vol. 6, pp. 60559-60569, 2018.
74. Raibert, M. (1986). *Legged robots that balance*. MIT press.
75. Ramezani, A., Hurst, J., Hamed, K., Grizzle, J. (2014). *Performance analysis and feedback control of ATRIAS, a three-dimensional bipedal robot*. Journal of Dynamic Systems, 136(2).
76. Ross, A., Fossen, T., Johansen, T. (2004). *Identification of underwater vehicle hydrodynamic coefficients using free decay tests*. IFAC Proceedings Volumes, 37(10),363-368.
77. S. Guo, S. Gu and L. Zheng. (2019). *Improvement and Evaluation for the Stability of Mobile Spherical Underwater Robots (SUR III)*, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, pp. 2512-2517.

78. S. Parasuraman and F. J. Hang. (2011). *Statically balanced walking of a crawler robot*, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Binjiang, pp. 1-6.
79. Saltarén, R., Puglisi, L.J., Sabater, J.M, Yime,E.(2017). *Thomás. Robótica Aplicada*, Dextra Editorial:Madrid, Spain, pp. 314–315.
80. Santos, Pablo Gonzalez; Garcia, Elena; Estremera, Joaquin. (2007). *Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots*. Springer Science & Business Media.
81. Seibold, Eugen, Wolfgang Berger. (2017). *The sea floor: an introduction to marine geology*. Springer.
82. Siciliano, Bruno, Oussama Khatib. (2016). *Springer handbook of robotics*. Springer.
83. Silver, William M. (1982). *On the equivalence of Lagrangian and Newton-Euler dynamics for manipulators*. The International Journal of Robotics Research, vol. 1, no 2, p. 60-70.
84. Sivaselvan, Mettupalayam V. (2008). *Dynamic force control with hydraulic actuators using added compliance and displacement compensation*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 37, no 15, p. 1785-1800.
85. Sivcev, S., Coleman, J., Omerdic, E., Dooly, G., Toal, D. (2018). *Underwater manipulators: A review*. Ocean Engineering, 163, 431-450.
86. Sreenath, K.; Park, H., Poulakakis , I., Grizzle, J.(2011). *A compliant hybrid zero dynamics controller for stable, efficient and fast bipedal walking on MABEL*. The International Journal of Robotics Research, 30(9), 1170-1193.
87. Fredsoe. (1997). *Hydrodynamics around Cylindrical Structures*; World Scientific Publishing: Singapore.
88. T. Ariyachartphadungkit, R. Vanijjirattikhan, T. Ariyachartphadungkit, S. Hasegawa. (2016). *Implementation of PID posture controller for 6 DOF underwater robot*, International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Da Nang, pp. 1-4.
89. T. Xue, J. Zhao and J. Wang. (2017). *Motion control for variable stiffness SLIP model of legged robot single leg*, Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, pp. 4711-4716.
90. Taghirad, H.D. (2013). *Parallel Robots: Mechanics and Control*, CRC Press: New York, NY, USA.

91. Taghirad, Hamid D. (2014). *Parallel robots: mechanics and control*. CRC press, 2013.
92. Tedeschi, Franco, Carbone, Giuseppe. (2014). *Design Issues for Hexapod Walking Robots*. Robotics 3, no. 2: 181-206.
93. Thomson, W.T. *Theory of Vibration with Applications*; CRC Press: New York, NY, USA, 1993.
94. V. and Kumar, K. J. Waldron. (1989). *A review of research on walking vehicles*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, pp. 243-266.
95. Wen, L. (1999). *Robot Analysis, the Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons: New York, NY, USA.
96. Zhao, J.; Feng, Z.; Chu, F. (2014). *Advanced Theory of Constraint and Motion Analysis for Robots Mechanisms*, Academic Press: Cambridge, MA, USA.