

ÍNDICE

Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	iv
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.1.1. Abordaje del problema.....	4
1.2. JUSTIFICACION.....	5
1.3. HIPOTESIS	6
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. General.....	6
1.4.2. Específicos	6
CAPITULO 2	7
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. SISTEMAS DE RECONOCIMIENTO DE PECES	7
2.1.1. Sistemas de DL en reconocimiento marino.....	8
2.1.2. Reconocimiento con condiciones no controladas	9
2.1.3. Sistemas de reconocimiento del pez león.....	11
2.2. MONITOREO SUBMARINO	13
2.2.1. Métodos tradicionales de monitoreo	13
2.2.2. Métodos de monitoreo con AUVs	15
2.2.2.1. Vehículos submarinos no tripulados.....	16
2.2.2.2. Procesos en el desplazamiento autónomo.....	17
2.2.2.3. Control de trayectorias en AUVs	19

2.2.3.	Vehículos submarinos aplicados al pez león.....	22
2.2.4.	Generación de caminos óptimos.....	24
2.2.4.1.	Los problemas de rutas en vehículos.....	24
2.2.4.2.	Problema del viajante de comercio (TSP)	25
2.3.	LIMITACIONES DEL ESTADO DEL ARTE.....	26
CAPITULO 3		27
3.	METODOLOGÍA DE LA GENERACIÓN AUTÓNOMA DE TRAYECTORIAS	27
3.1.	EQUIPO UTILIZADO	29
3.2.	DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN AUTÓNOMA DE TRAYECTORIAS	30
3.2.1.	Diseño del espacio marino en 3D	31
3.2.2.	Diseño del sistema de detección de estructuras marinas.....	34
3.2.2.1.	Visión estéreo del fondo simulado	35
3.2.3.	Localización de los puntos de búsqueda	37
3.2.4.	Transformación de coordenadas de píxeles a metros.....	39
3.2.5.	Generación de ruta más corta	42
3.2.5.1.	Implementación y solución del TSP	43
3.2.6.	Método de evaluación del sistema generación autónoma de trayectorias.....	45
3.2.6.1.	Procedimiento para evaluar los modelos de líneas de intersección	45
3.2.6.2.	Procedimiento para evaluar los modelos propuestos con la ruta preestablecida.....	47
3.3.	RESULTADOS Y DISCUSIONES DEL CAPÍTULO	48
3.3.1.	Resultados del sistema de generación autónoma de rutas óptimas.....	48
3.3.2.	Análisis y discusiones.....	53
3.4.	CONCLUSIONES DEL SISTEMA DE GENERACIÓN AUTÓNOMA.....	55
CAPITULO 4		58
4.	METODOLOGÍA DEL SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DEL PEZ LEÓN	58
4.1.	MODELOS PROBADOS PARA EL SISTEMA DE RECONOCIMIENTO.....	58

4.1.1.	Descriptor HOG y clasificador SVM	58
4.1.2.	Redes Neuronales Convolucionales	59
4.1.3.	YOLOv2.....	60
4.2.	IMPLEMENTACIÓN CON ALGORITMO YOLOv4 Y SSD-MobileNet-v2	61
4.2.1.	Equipo utilizado	62
4.2.2.	Base de datos.....	63
4.2.3.	Etiquetado de imágenes	64
4.2.4.	Implementación	64
4.2.5.	Procedimiento de validación cruzada	64
4.2.6.	Métricas para evaluar el desempeño.	65
4.3.	RESULTADOS Y DISCUSIONES DEL CAPÍTULO	66
4.3.1.	Resultados del sistema de reconocimiento del pez león.....	66
4.3.2.	Análisis y discusiones.....	71
4.4.	CONCLUSIONES DEL SISTEMA DE RECONOCIMIENTO	73
	CONCLUSIONES GENERALES	74
	TRABAJO FUTURO	76
	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXOS	93

Lista de Tablas

Tabla 3-1. Resultados de distancias de rutas óptimas para los escenarios; separados por baja, media y alta densidad.....	51
Tabla 3-2. Distancias y porcentajes de diferencia entre las rutas de los escenarios de baja densidad.	53
Tabla 3-3. Distancias y porcentajes de diferencia entre las rutas de los escenarios de densidad media.	54
Tabla 3-4. Distancias y porcentajes de diferencia entre las rutas de los escenarios de densidad alta.	55
Tabla 4-1. Resultados de validación cruzada de 5-veces en el entrenamiento con los sistemas YOLOv4 y SSD-MobileNet-v2.	67
Tabla 4-2. Resultados de las métricas de evaluación del conjunto y subconjunto de pruebas con el modelo YOLOv4.	67

Lista de Figuras

Figura 1-1. a) Pterois volitans y b) Pterois miles.....	3
Figura 1-2. Casos de mimetismo del pez león.	4
Figura 2-1. Ejemplo de foto-etiquetado de dos peces en el sistema de foto-identificación [54]. ..	11
Figura 2-2. Sistema de reconocimiento del pez león de Naddaf et al. (2018); a) interfaz de usuario de la PC en la superficie y b) ejemplos de identificaciones correctas [55].	12
Figura 2-3. Búsqueda exhaustiva o libre realizado por el equipo UCIA del CICY.	14
Figura 2-4. Método de monitoreo en zigzag siguiendo un transecto lineal [67]	15
Figura 2-5 AUVs comerciales; a) Echo Ranger, b) Nessie IV y c) Remus 6000.....	17
Figura 2-6. AUVs militares; a) SeaOtter MKII, b) Bluefin-9 y c) Gavia Defence.	17
Figura 2-7. AUVs de investigación; a) Morpheus, b) Infante y c) SQX-500.....	17
Figura 2-8. AUVs académicos y recreacionales; 2011 SONIA, a) Drekar y c) SubjuGator 7.....	17
Figura 2-9. Ejemplos de visualización de AUVs por medio de sonares; a) Sonar lateral y b) sonar 3D de apertura sintética [82].....	18
Figura 2-10. Diagrama simplificado de la arquitectura de software de MEDUSA [84].	20
Figura 2-11. Esquema de una trayectoria de una misión de MEDUSA [84].	21
Figura 2-12. Ejemplos de uso de monitoreo en cuadrículas densas y anchas [89].	21

Figura 2-13. Características del ROV (La Mar); a) diagrama de bloques de la sección en superficie y submarina, b) imagen del ROV y descripción de partes [55].	22
Figura 2-14. Versión preliminar del vehículo submarino bio-inspirado [90].	23
Figura 2-15. Prototipo de ROV del Politécnico de Worcester [57].	23
Figura 2-16. Vehículo ROV “The guardian LF1” [91].	24
Figura 3-1. Momento de la generación de trayectorias en la metodología general.	27
Figura 3-2. Ejemplos para la trayectoria de censado del AUV; a) trayectoria para un vehículo distinto al de monitoreo, b) trayectoria para el mismo vehículo que realiza el monitoreo.	29
Figura 3-3. Diagrama del sistema de generación autónoma de trayectorias.	30
Figura 3-4. Elementos 3D de vegetación simulados en Blender	31
Figura 3-5. Elementos de rocas, arrecifes y corales simulados en Blender.	32
Figura 3-6. Configuraciones de espacio simulado en Gazebo.	33
Figura 3-7. Configuración gráfica de los nodos en el sistema ROS.	33
Figura 3-8. Ejemplos de escenarios simulados en Gazebo.	34
Figura 3-9. Configuración óptica de la visión estéreo.	36
Figura 3-10. Imagen de profundidad a partir de 2 imágenes por visión estéreo.	37
Figura 3-11. Configuración de líneas de intersección.	39
Figura 3-12. Apertura de los ángulos en una cámara.	40
Figura 3-13. Elementos que se relacionan en el arreglo óptico; a) corte horizontal y b) triángulo generado hacia un punto de interés.	40
Figura 3-14. Transformación de coordenadas de pixeles a metros.	42
Figura 3-15. Obtención de rutas óptimas del escenario “10”; a) monitoreo completo y b) monitoreo libre	44
Figura 3-16. Propuesta de sistema de visión para realizar monitoreo.	46
Figura 3-17. Trayectoria con distancia total de una ruta preestablecida supuesta para un AUV.	48
Figura 3-18. Sesgos generados por las líneas de intersección en escenarios de alta densidad de elementos.	49
Figura 3-19. Sesgos generados por las líneas de intersección en escenarios de media densidad de elementos.	50
Figura 3-20. Sesgos generados por las líneas de intersección en escenarios de baja densidad de elementos.	50
Figura 3-21. Resultados del monitoreo libre (Mol-AUV) y minucioso (Mom-AUV) sobre el escenario 6 de densidad baja de elementos.	52

Figura 3-22. Resultados del monitoreo libre (Mol-AUV) y minucioso (Mom-AUV) sobre el escenario 23 de densidad media de elementos.....	52
Figura 3-23. Resultados del monitoreo libre (Mol-AUV) y minucioso (Mom-AUV) sobre el escenario 1 de densidad alta de elementos.....	53
Figura 4-1. Momento en el que se realiza el reconocimiento del pez león en la metodología general.....	58
Figura 4-2. Representación de los gradientes orientados; a) Cuerpo y espinas para el modelo 1, b) Solo cuerpo para modelo 2 y c) Sólo cabeza para el modelo 3.	59
Figura 4-3. Modelo implementado de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para el Pez León.....	60
Figura 4-4. Diagrama del sistema de detección del pez león con YOLOv2.....	60
Figura 4-5. Diagrama de los sistemas de detección de YOLOv4 y SSD-MobileNet-v2 con Validación Cruzada de 5k.....	62
Figura 4-6. Subconjuntos de prueba en relación a la iluminación presente en el pez; a) iluminación baja, b) media y c) alta.....	63
Figura 4-7. Representación gráfica de la métrica Intersección sobre Unión.	65
Figura 4-8. Resultados de detección de FP y TP; 4 peces león identificados correctamente (TP) y 7 falsas identificaciones.	68
Figura 4-9. Resultados de detección de FN y TP; 7 peces león correctamente identificados (TP) y 12 faltantes para identificar (FN), incluido el pez león de la subimagen (d).....	69
Figura 4-10. Múltiples identificaciones del pez león con altos valores de IoU y de confianza. ...	70
Figura 4-11. Resultados de alto grado de mimetismo causados por la forma y el color del fondo marino; el sistema sólo identificó correctamente al pez en 7(b).....	70
Figura 4-12. Detección con baja iluminación en imágenes de 180°	71

RESUMEN

La llegada de especies a un hábitat del cual no son nativas, pueden provocar un desequilibrio ecológico grave para el balance biológico de los ecosistemas. *Pterois volitans* y *Pterois miles*, ambas especies comúnmente llamadas “pez león” son considerados una plaga en las costas del Caribe en el mar Atlántico, provocando preocupación de gestores y científicos de la pesca y la conservación marina, por la posible afectación a la biodiversidad de las zonas involucradas. Los métodos tradicionales de observación y monitoreo marino son costosos, limitados y principalmente lentos. Para hacer frente a la problemática se ha propuesto el proyecto de diseño de un Vehículo Submarino Autónomo (AUV, por sus siglas en inglés Autonomous Underwater Vehicle) para monitoreo y localización del pez león; el cual contará con elementos que brindarán autonomía, como el banco de baterías y un sistema de visión artificial. La aportación de esta investigación es en el sistema de visión, la cual se divide en dos tareas principales: tarea 1; el reconocimiento del pez león mediante el sistema de reconocimiento basado en el algoritmo YOLOv4 (You Only Look Ones) y la tarea 2; la generación autónoma de trayectorias óptimas por medio de visión estereoscópica, técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) y TSP (Travel Salesman Problem) para encontrar el camino más corto. Estas tareas contribuirán a que el vehículo tenga un mayor grado de autonomía. El sistema de visión contará con cámaras de alta resolución y el dispositivo de procesamiento integrado Jetson Nano de NVIDIA.

En cuanto al sistema de reconocimiento del pez león, se han obtenido resultados de detección de 89.79% de precisión, 79.15% de mAP (mean Average Precision) y un 63.66% de sensibilidad con el sistema YOLOv4.

El sistema de generación de trayectorias óptimas fue probado en 42 escenarios mediante el simulador Gazebo, se diseñaron 2 modos de monitoreo; monitoreo libre (propuesta principal) y el otro minucioso o detallado, el primero obtiene un ahorro de distancia recorrida promedio del 52.49% menores que una ruta preestablecida, mientras el segundo modelo tiene un 21.56%, este ahorro de distancias se reflejará, por consecuencia, en un menor consumo de energía.

ABSTRACT

The arrival of species to a habitat, of which they are not native, can cause a serious ecological imbalance for the biological balance of ecosystems. *Pterois volitans* and *Pterois miles*, both species commonly called "lionfish" are considered a pest on the Caribbean coasts in the Atlantic Sea, causing concern of managers and scientists of fisheries and marine conservation, due to the possible impact on the biodiversity of the areas involved. Traditional marine observation and monitoring methods are expensive, limited, and primarily time consuming. To face the problem, the project to design an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) for monitoring and locating lionfish has been proposed; which will have elements that will provide autonomy, such as the battery bank and an artificial vision system. The contribution of this research is in the vision system, which is divided into two main tasks: task 1; recognition of the lionfish using the algorithm YOLOv4 (You Only Look Ones) recognition system and task 2; the autonomous generation of optimal trajectories through stereo vision, Digital Image Processing (PDI) and TSP (Travel Salesman Problem) techniques to find the shortest way. These tasks will contribute to the vehicle having a greater degree of autonomy. The vision system will feature high-resolution cameras and NVIDIA's Jetson Nano integrated processing device.

Regarding the lionfish recognition system, detection results of 89.79% precision, 79.15% mAP (mean Average Precision) and 63.66% sensitivity have been obtained with the YOLOv4 system.

The optimal trajectory generation system was tested in 42 scenarios using the Gazebo simulator, 2 monitoring modes were designed; free monitoring (main proposal) and the other meticulous or detailed, the first one obtains an average distance traveled savings of 52.49% less than a pre-established route, while the second model has 21.56%, this distance savings will be reflected, consequently, in lower power consumption.