



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i3.2073>

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículo de investigación

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Control of linear trajectory of the robot fish bioinspired in a tuna with BCF

Controle da trajetória linear do peixe robô bioinspirado em um atum com BCF

Diego Ramiro Ñacato-Estrella ^I

diego.nacato@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7233-9076>

Fausto Ramiro Cabrera-Aguayo ^{II}

fausto.cabrera@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0816-155X>

Carlos Ignacio Moncayo-Puga ^{IV}

c.monca271993@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0551-1590>

Vanessa Carolina Dumancela-Aguirre ^{III}

vanessadumancela@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4138-1685>

Adriana Vanessa Chicaiza Zambrano ^V

adrianachicaiza122526@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9081-9535>

Correspondencia: diego.nacato@epoch.edu.ec

***Recibido:** 23 de mayo del 2021 ***Aceptado:** 20 de junio del 2021 *** Publicado:** 20 de julio del 2021

- I. Magister en Sistemas de Control y Automatización Industrial, Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales, Asistencia en Seguridad Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Master Universitario en Automática y Robótica, Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Investigador Independiente, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente, Ecuador.
- V. Investigador Independiente, Ecuador.

Resumen

Este estudio presenta el diseño del sistema eléctrico y de control de un pez robótico, autónomo, capaz de navegar, manteniendo una profundidad y conducta similar a la de los peces reales, tanto en la forma de propulsión como en la rotación del pez al nadar. A estos efectos, se consideraron dos grados, con el fin de que el diseño pudiera tener un desplazamiento BCF del modo uniforme. Se consideró que la cabeza del robot bioinspirado estaba fija, aplicando así el análisis cinemático solo al cuerpo. Para solucionar la cinemática directa se seleccionó el algoritmo de Denavit Hartenberg (DH). De esto se obtuvo una matriz de transformación, se calcularon los ángulos de articulación, se hizo un diseño electrónico por módulos de robótica y control, se resolvió la cinemática inferencial, se hizo análisis hidrodinámico y cálculo de potencialidad de flotación del pez. Se diseñó y probó procesos natatorio del prototipo. Se comprobó el correcto envío de datos por parte el MPU 6050 al teléfono y la aplicación además la manera en que reciben las señales del mismo los motores. Entre las conclusiones más relevantes destaca lo siguiente: Se diseñó e implementó un robot bioinspirado con la morfología de un pez atún, con dos grados de libertad, usando para estos dos micro servomotores sg90 impermeabilizados, un sistema de control con comunicación vía bluetooth, logrando así el desplazamiento deseado del robot, un desplazamiento uniforme propio del pez atún.

Palabras Clave: Robótica bioinspirada; cinemática; prototipo electrónico; desplazamiento BCF; pez atún.

Abstract

This study presents the design of the electrical and control system of a robotic, autonomous fish, capable of navigating, maintaining a depth and behavior similar to that of real fish, both in the form of propulsion and in the rotation of the fish when swimming. For these purposes, two degrees were considered, in order that the design could have a BCF displacement of the uniform mode. The head of the bioinspired robot was considered to be fixed, thus applying the kinematic analysis only to the body. To solve the direct kinematics, the Denavit Hartenberg (DH) algorithm was selected. From this, a transformation matrix was obtained, the articulation angles were calculated, an electronic design was made by robotics and control modules, the inferential kinematics was solved, hydrodynamic analysis was made and the floating potentiality of the fish was calculated. The prototype's swimming processes were designed and tested. The correct sending of data by the MPU 6050 to the phone and the application

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

was verified, as well as the way in which the engines receive the signals. Among the most relevant conclusions, the following stand out: A bio-inspired robot with the morphology of a tuna fish, with two degrees of freedom, was designed and implemented, using for these two waterproof sg90 micro servomotors, a control system with communication via bluetooth, thus achieving the desired displacement of the robot, a uniform displacement of the tuna fish.

Keywords: Bio-inspired robotics; kinematics; electronic prototype; BCF displacement; tuna fish.

Resumo

Este estudio presenta o projeto do sistema elétrico e de controle de um peixe robótico, autônomo, capaz de navegar, mantendo uma profundidade e comportamento semelhantes aos de peixes reais, tanto na forma de propulsão quanto na rotação dos peixes ao nadar. Para tanto, foram considerados dois graus, para que o projeto pudesse ter um deslocamento BCF do modo uniforme. A cabeça do robô bioinspirado foi considerada fixa, aplicando-se a análise cinemática apenas ao corpo. Para resolver a cinemática direta, o algoritmo Denavit Hartenberg (DH) foi selecionado. A partir disso, foi obtida uma matriz de transformação, calculados os ângulos de articulação, feito um projeto eletrônico por robótica e módulos de controle, resolvida a cinemática inferencial, feita a análise hidrodinâmica e calculada a potencialidade flutuante dos peixes. Os processos de natação do protótipo foram projetados e testados. Foi verificado o envio correto dos dados do MPU 6050 para o telefone e o aplicativo, bem como a forma como os motores recebem os sinais. Dentre as conclusões mais relevantes, destacam-se: Foi projetado e implementado um robô bioinspirado com morfologia de atum, com dois graus de liberdade, utilizando para esses dois microsservomotores sg90 impermeáveis, um sistema de controle com comunicação via bluetooth, conseguindo assim o deslocamento desejado do robô, um deslocamento uniforme do atum.

Palavras-chave: Robótica bioinspirada; cinemática; protótipo eletrônico; deslocamento BCF; atum.

Introducción

A lo largo de la evolución de la robótica, la naturaleza ha sido la principal fuente de ideas y de inspiración para la creación de nueva tecnología, lo que ha generado estudios morfológicos de especies que han despertado gran interés por robots acuáticos no tripulados bioinspirado, los cuales generan a su vez, una serie de ventajas como la reducción de tamaño del robot, mayor eficiencia en

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

lugares de difícil acceso, recolección de datos para proyectos de investigación; un mejor desempeño y mejor adaptabilidad a la hora de interactuar en diferentes ambientes. Hoy por hoy innumerables campos requieren el uso de robots móviles no tripulados, y gracias al avance de estos se ha podido alcanzar nuevos horizontes y llegar a territorios antes desconocidos o de difícil acceso. En virtud de la capacidad de movimiento del pez en el agua, el cuerpo más la aleta caudal y la maniobrabilidad complementaria en las aletas accesorias, se propone un esquema de propulsión sintetizada que involucra una aleta caudal y un par de aletas pectorales en el movimiento del pez atún.

Con los antecedentes antes mencionados, este trabajo ha sido inspirado en un pez de la región del Ecuador, con el objetivo de diseñar y construir un robot bioinspirado, que imite la locomoción del pez atún, a tenor de observar la influencia que tiene la aleta caudal sobre la natación del mismo. Al analizar las características morfológicas del pez, el cual posee un cuerpo hidrodinámico de forma fusiforme, con una aleta caudal en forma de medialuna, dos aletas dorsales, aletas pectorales, que pueden guardarse para nadar a gran velocidad y aletas triangulares, que se extienden a lo largo de los laterales superior e inferior de la cola. La investigación se centra en la imitación del diseño robótico prototípico, para la implementación del movimiento natatorio e impulsor de la aleta caudal. Al analizar la aleta caudal se obtiene la locomoción del pez, con un grado de velocidad específica, a través de servomotores. La aleta caudal es una aleta impar situada al final del cuerpo del pez, es la aleta de la cola, puede tener un solo lóbulo o dos lóbulos, es el principal órgano para generar el empuje por el que se mueven la mayoría de las especies de peces, normalmente es la más desarrollada y tiene una gran variedad de formas. Tiene dos funciones: por un lado, permite impulsar al pez hacia adelante y, por otro lado, actúa como timón para poder girar. La forma específica por la que un pez nada se corresponde con la aleta caudal, la forma de esta aleta o cola trasera del pez aumenta o disminuye la fuerza de empuje del pez, es fuerte con forma de arco terminado en dos zonas puntiagudas que le dan aspecto de media luna.

Exactamente lo que se persigue en este estudio es diseñar el sistema eléctrico y de control de un pez robótico, siendo este autónomo, capaz de navegar manteniendo una profundidad y de simular conductas de los peces reales, imitando el comportamiento al nadar de los mismos, tanto en la forma de propulsión como en la rotación del pez. Otra de las razones para las cuales, este trabajo es útil, es para estudiar a otros peces, pues sirve para investigarlos sin invadir su hábitat natural. El ensamblaje del pez robot debe ser hermético y resistente a la corrosión, es decir todas sus partes

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

deben estar impermeabilizadas, el prototipo a realizar es un diseño de 2 grados de libertad que facilitara el movimiento del pez.

Materiales y métodos

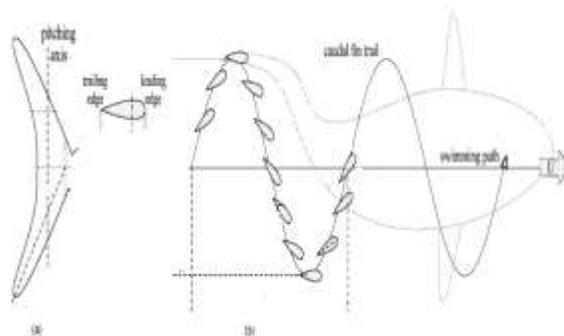
La aleta caudal, está ubicada al final del cuerpo de los peces, es el principal órgano para generar el empuje, en el caso del atún se caracteriza por ser muy delgado y tener una fuerte quilla lateral entre otras dos más pequeñas. La presente investigación busca que el robot se asemeje lo más posible a un pez atún en la realidad.

Sistemas de locomoción

Desplazamiento Ondulatorio y Diseño Biométrico

Los peces poseen forma hidrodinámica, se desplazan mediante movimiento ondulatorio. Su locomoción se origina por la reacción del flujo de agua que lo rodea y las flexiones en los músculos a largo y ancho de su cuerpo. Como se observa en la figura 1 la aleta que permite el movimiento del atún. La locomoción BCF imita una forma de onda que es en dirección contraria al avance del pez y se extiende hasta su aleta caudal. Uno de sus tipos, es el uniforme, método más eficiente de locomoción. Por movimientos del cuerpo o de la aleta caudal, se crea mayor empuje y aceleración. Para el presente trabajo se seleccionó el pez atún, este usa como elementos de propulsión y maniobrabilidad la aleta caudal.

Figura 1: (a) Vista lateral de la forma de la aleta caudal para nadadores tuniformes [14].



Cinemática

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Se consideraron dos grados de libertad con el fin de que el diseño pueda tener un desplazamiento BCF del modo uniforme. En la Figura 1 se presenta el diseño lateral de la forma de la aleta caudal para nadadores tuniformes. Debido que el modo tuniforme utiliza la aleta caudal para un 90% de empuje, tanto en la cinemática directa como inversa, se consideró que la cabeza del robot bioinspirado estaba fija, aplicando así el análisis cinemático solo al cuerpo. Para solucionar la cinemática directa se seleccionó el algoritmo de Denavit Hartenberg (DH).

Tabla 1: Parámetros DH

θ	D	A	α
θ_1	0	l_1	0
θ_2	0	$l_2+l_3/2$	0

Con los parámetros descritos en la Tabla 1, y tras haber aplicado el algoritmo DH se obtiene la siguiente matriz de transformación.

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \cos(\theta_1) + (l_2 + \frac{l_3}{2}) \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l_1 \text{sen}(\theta_1) + (l_2 + \frac{l_3}{2}) \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las variables θ_1, θ_2 pertenecen a los ángulos de cada articulación y l_1, l_2, l_3 a la longitud de cada eslabón, descritos a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de longitud y masa de robot bioinspirado para 2 gdl

Eslabón	Longitud [mm]	Masa [Kg]
1	48.52	0.00151
2	61.58	0.00568
3	38.12	0.0054

La cinemática inversa se resolvió el método geométrico, a pesar de los diferentes métodos que existen en la actualidad.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_y}{P_x}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{R^2 - \left(l_2 + \frac{l_3}{2}\right)^2 + l_1^2}{2l_1 R}\right)$$

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{R^2 - \left(l_2 + \frac{l_3}{2}\right)^2 - l_1^2}{2l_1 \left(l_2 + \frac{l_3}{2}\right)} \right)$$

con $R^2 = P_x^2$

Donde P_x son las coordenadas en las que se requiere posicionar al extremo de robot.

Se resolvió la cinemática diferencial

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} Jv^1 \\ Jw^1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Jv_1^1 & 0 \\ Jw_1^1 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Jv^1 \\ Jw^1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -lc_1 \sin \theta_1 & 0 \\ lc_1 \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Jv^2 \\ Jw^2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} Jv_2^1 & Jv_2^2 & 0 \\ Jw_2^1 & Jw_2^2 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} Jv^2 \\ Jw^2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -lc_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & lc_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Dinámica

La dinámica inversa se resolvió mediante el Algoritmo computacional Newton Euler, para ello es necesario definir la posición, velocidad y aceleración de cada articulación además otros parámetros como son:

- Los parámetros DH descritos en la Tabla 1
- Masa de cada elemento (Kg) descritos en la Tabla 2
- Matrices de Inercia (Kg-m²)

$$I_1 = \begin{pmatrix} 23617020 & -67780 & 28590 \\ -67780 & 7743820 & -7819390 \\ 28590 & -7819390 & 18136190 \end{pmatrix}$$

$$I_2 = \begin{pmatrix} 6204350 & 10 & 10 \\ 10 & 1117020 & -1400900 \\ 10 & -1400900 & 5567100 \end{pmatrix}$$

Controlador de acción proporcional y derivativa (PD)

El controlador derivativo se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas.

Si consideramos que:

- $y(t)$ = Salida diferencial.
- $e(t)$ = Error (diferencia entre medición y punto de consigna [PC]. El PC no es otra cosa que el nivel deseado al que queremos que vuelva el sistema)
- T_d = Tiempo diferencial, se usa para dar mayor o menor trascendencia a la acción derivativa.

La salida de este regulador es:

$$y(t) = t_d \frac{de(t)}{dt}$$

Que, en el dominio de Laplace, será:

$$Y(S) = T_d * s * E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(S) = \frac{Y(s)}{E(s)} = T_d * s$$

Si la variable de entrada es constante, no da lugar a respuesta del regulador diferencial, cuando las modificaciones de la entrada son instantáneas, la velocidad de variación será muy elevada, por lo que la respuesta del regulador diferencial será muy brusca, lo que haría desaconsejable su empleo.

Al escoger el controlador PD fue para tener un control anticipativo, ya que $\frac{de(t)}{dt}$ representa la pendiente del error $e(t)$. Es decir, al conocer la pendiente, el controlador puede emplearla para anticipar la dirección del error y controlar mejor el proceso, la salida del bloque de control responde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = k_p * t_d \frac{de(t)}{dt} + k_p * e(t)$$

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

K_p y T_d son parámetros ajustables del sistema. A T_d es llamado tiempo derivativo y es una medida de la rapidez con que un controlador PD compensa un cambio en la variable regulada, comparado con un controlador P puro.

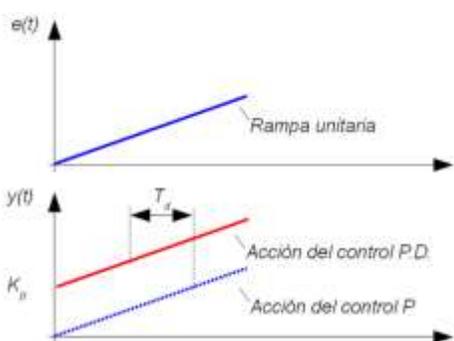
Que, en el dominio de Laplace, será:

$$Y(S) = k_p * t_d * s * E(s) + k_p * E(s)$$

por tanto, la función de transferencia del bloque de control PD será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = k_p * (T_d * s + 1)$$

Figura 2: Grafica rampa unitaria y la influencia del control PD



Análisis hidrodinámico

Las fuerzas hidrodinámicas que afectan un cuerpo sumergido son bastantes complejas ya que dependen de muchas variables como son las características del fluido, la temperatura, la presión y la forma geométrica del cuerpo entre otras. Las fuerzas hidrodinámicas son las fuerzas de masa añadida y las fuerzas viscosas. Puglisi, Carrera, & Pedro, (2014).

Masa añadida es una fuerza que se opone al movimiento del cuerpo en el fluido y depende de la aceleración del cuerpo, como también puede serlo de la velocidad. La masa añadida se suele asociar con la cantidad de fluido que se encuentra alrededor del cuerpo, y que debe acelerarse cuando el cuerpo también lo hace. A diferencia de la masa de cuerpo rígido, la masa añadida no siempre cumple con la propiedad de ser constante y simétrica, como tampoco es siempre diagonal. en este caso se propone que la masa sea constante ya que el pez no posee articulaciones en su cuerpo, es decir posee un cuerpo rígido. Puglisi, Carrera, & Pedro, (2014).

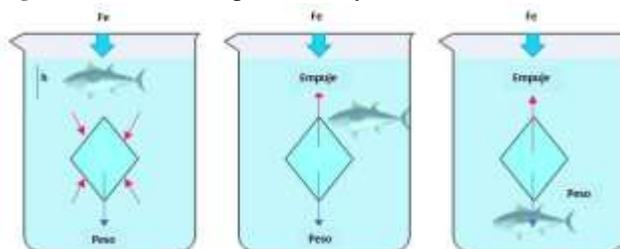
Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Fuerzas Viscosas: Estas fuerzas son el resultado de la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el cuerpo. Se suelen clasificar según el efecto sobre el cuerpo en: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación. Las fuerzas de arrastre se oponen al movimiento y actúan en dirección opuesta, mientras que las fuerzas de sustentación son perpendiculares al movimiento relativo del cuerpo sobre el fluido. Puglisi, Carrera, & Pedro, (2014).

Flotación del pez

Para que un pez pueda flotar, estos utilizan diversos mecanismos, entre ellos el más común es el de la utilización de una vejiga natatoria que les permite sumergirse o emerger, razón por la cual para que el robot pez flote debemos aplicar el principio de Arquímedes que nos dice que todo objeto sumergido en un fluido experimentará una fuerza de empuje, con este principio deben igualarse las fuerzas peso del robot y la fuerza de empuje para que el pez se mantenga flotando a cierto nivel. Como se observa en la figura 3:

Figura 3: Grafica rampa unitaria y la influencia del control PD



Para calcular el empuje resultante, recuerda que $\text{Empuje} = \text{“peso del volumen de agua”}$. Por lo tanto, necesitamos saber la masa del agua, para lo que a su vez debemos calcular el volumen del pez y saber la densidad del agua (1000g/l).

Para ello se utiliza un cuerpo rígido irregular para determinar el volumen, se sumerge el cuerpo en un recipiente lleno de agua, la diferencia entre el recipiente lleno y la nueva cantidad de agua que requiere es el volumen del pez.

Volumen del pez: fue obtenida experimentalmente y es:

$$1 \text{ litros} = 1000 \text{cm}^3$$

La masa del pez medida en una balanza es de $1.85 \text{ lb} = 0.84 \text{ kg}$

Como densidad = masa/volumen

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.84 \text{ kg}}{1000 \text{ cm}^3} = 0.00084 \text{ kg/m}^3$$

para calcular que el pez se hunda completamente se aplica el principio de Arquímedes.

$$\Sigma Fy = \text{fuerza de empuje} - \text{peso}$$

$$\Sigma Fy = E - W$$

$$\Sigma Fy = \rho_{H2O} * g * V - \rho_{pez} * g * V$$

$$F = [9.8 * 10^3 - 0.84 * 9.8 * 20^3]$$

$$F = 7.53N$$

En libras es equivalente a 1 lb, es el peso necesario de la boya para que el pez flote.

Características técnicas del robot

- Dimensiones: Las dimensiones del robot están en función de que sea lo más compactas posibles y que permitan la máxima movilidad dentro del agua al robot.

Tabla 3: Partes y dimensiones del robot

PARTE	DIMENSIONES
Cabeza	(8x8)cm
Cuerpo	(11x12)cm
Aleta caudal primera sección	(4.5x4.2)cm
Aleta caudal segunda sección	(4x4)cm
Aleta caudal tercera sección	(3x11)cm

- Peso: No existe restricciones de peso
- Alimentación: La fuente de energía debe tener una corriente de 300mA y voltaje 7.4V para alimentar los circuitos eléctricos de control y los motores.

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Tabla 4: Partes y dimensiones del robot

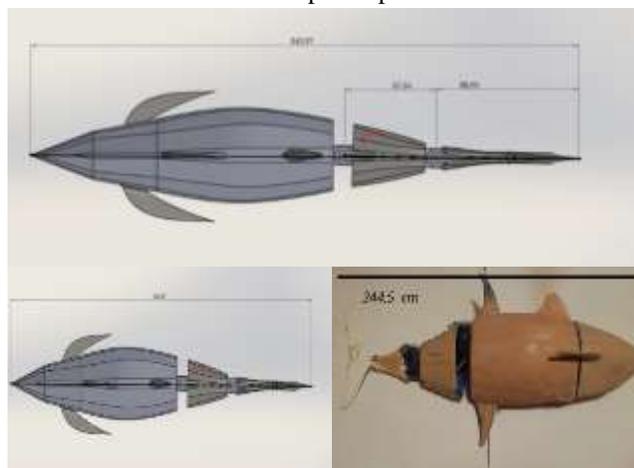
COMPONENTES	CARACTERISTICAS
MICROCONTROLADOR	Álmega328
SERVOMOTOR SG90	Actuadores 5v
BATERIA LIPO	Fuente de alimentación 11.1v
ACELEROMETRO	IMU sensor de aceleración
CONEXION BLUETOOTH	Modulo

Diseño y construcción del prototipo

La morfología del prototipo del pez atún está dividida en 4 partes la cabeza, el cuerpo seccionado en dos y la aleta caudal de dos grados de libertad, partes que fueron diseñadas en Solid Works de diferentes dimensiones y acopladas a las medidas de la aleta caudal. El diseño del robot bioinspirado se lo realizó en el Software Solid Works, este diseño se muestra en la figura 3. Con este diseño se usó impresión 3d con material PLA.

En el cuerpo se encuentra el mecanismo, tanto la parte eléctrica, la parte mecánica la fuente de alimentación de nuestro sistema y el sensor el cual nos brinda los datos de posición del pez a través de una programación ya establecida con comunicación Bluetooth, la parte electrónica está totalmente impermeabilizada para evitar daños a los componentes electrónicos.

Figura 3: Diseño en solidwork de un pez atún robot bioinspirado con locomoción de la aleta caudal en comparación con el prototipo



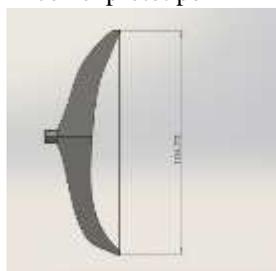
La morfología del prototipo del pez atún está dividida en 4 partes la cabeza, el cuerpo seccionado en dos y la aleta caudal de dos grados de libertad, partes que fueron diseñadas en Solid Works de diferentes dimensiones y acopladas a las medidas de la aleta caudal. El diseño del robot bioinspirado

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

se lo realizó en el Software Solid Works, este diseño se muestra en la figura 3. Con este diseño se usó impresión 3d con material PLA.

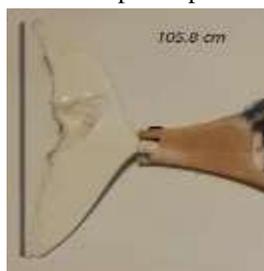
En el cuerpo se encuentra el mecanismo, tanto la parte eléctrica, la parte mecánica la fuente de alimentación de nuestro sistema y el sensor el cual nos brinda los datos de posición del pez a través de una programación ya establecida con comunicación Bluetooth, la parte electrónica está totalmente impermeabilizada para evitar daños a los componentes electrónicos.

Figura 4: Diseño en solidwork de un pez atún robot bioinspirado con locomoción de la aleta caudal en comparación con el prototipo



Las aletas las que servirán de estabilidad para el pez. Una vez de haber diseñado por separado cada una de las partes se procede a unir todo para poder tener como resultado final el pez robot como se puede observar en la figura 5.

Figura 5: Diseño en solidwork de un pez atún robot bioinspirado con locomoción de la aleta caudal en comparación con el prototipo



Se usó dos micro servomotores sg90 los cuales previamente pasaron por un proceso de impermeabilización, para lo cual fue necesario desmontar los servomotores, colocar silicón sobre el circuito interno y en los engranajes se colocó grasa para evitar falla mecánica e impedir el filtraje de agua hacia el interior.

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Una vez impermeabilizados los servomotores se hizo el montaje de las piezas impresas en 3d acopladas con los dos servomotores, otra medida de protección tomada para evitar el filtraje de agua fue masillar todo el cuerpo de pez.

Los dos servomotores integran el sistema de propulsión, debido a las restricciones mecánicas que se presenta se da un rango de 50° a 130° en el servomotor ubicado en el centro del pez y un rango de 70° a 110° para el servomotor cercano a la aleta caudal. Cuando los dos servomotores entran en funcionamiento se observa un movimiento ondulatorio similar al que presenta el tiburón blanco. Además, a este prototipo tiene comunicación inalámbrica vía bluetooth. Una batería lipo de 500mA suficiente para darle autonomía al robot durante 2 horas.

En cuando al control se implementó un circuito que consta de dos Arduino nano, un módulo bluetooth y un mpu, este sistema de control permite monitorear y controlar al robot. Dicho sistema, así como la batería se encuentran ubicados en la parte central del robot.

Análisis y discusión de resultados

Se realizaron pruebas de nado dentro y fuera del agua, en la primera los resultados fueron satisfactorios ya que el movimiento del pez parecía fluido y la recolección de datos se generó sin ningún problema.

Figura 6: Prueba de nado fuera del agua



El pez inicia su movimiento enviándole una señal vía Bluetooth, se envía desde un móvil con la aplicación Bluetooth terminal con la palabra inicio2 y el pez empezara el movimiento con el motor ubicado en el segundo grado de libertad, posteriormente se escribe la palabra inicio y el pez mueve el motor ubicado en el primer grado de libertad, si se desea para el movimiento se escribe la palabra reset y el pez apagara los motores. Se realizó la prueba de la correcta comunicación entre el MPU 6050, el módulo Bluetooth y de los servo motores como se muestra en las figuras 4 -5-6-7 y 8.

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Figura 7: Pruebas realizadas de los servomotores y su funcionamiento de acuerdo a la programación.



Figura 8: Pruebas realizadas de los motores y envío de datos del MPU 6050

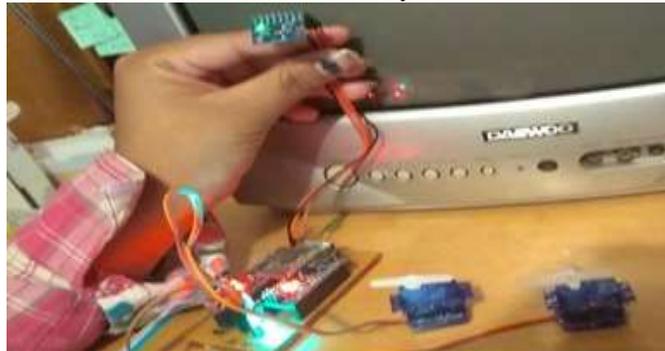
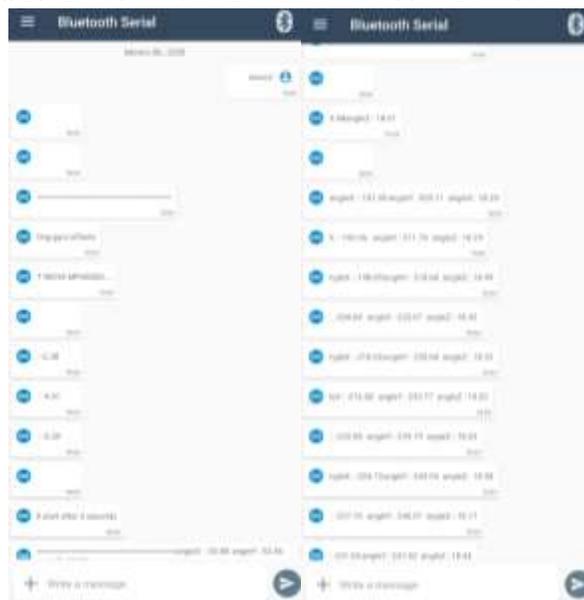


Figura 9: Pruebas realizadas de los motores y envío de datos del MPU 6050 al módulo Bluetooth operado por teléfono



Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Figura 10: Datos de comunicación recibidos en Bluetooth terminal



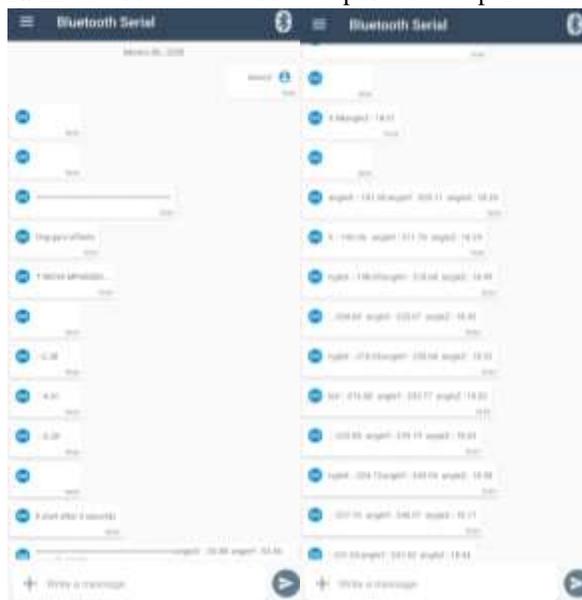
Se comprobó el correcto envío de datos por parte el MPU 6050 al teléfono y la aplicación además la manera en que reciben las señales del mismo los motores. En la aplicación Bluetooth terminal se muestra los datos en los ejes x, z. Durante las pruebas realizadas bajo el agua, se comprobó que el módulo Bluetooth envía los datos del movimiento del pez. Para ello se aplicaron los mismos pasos expuestos anteriormente.

Figura 11: Foto del pez atún robot bioinspirado nadando bajo el agua



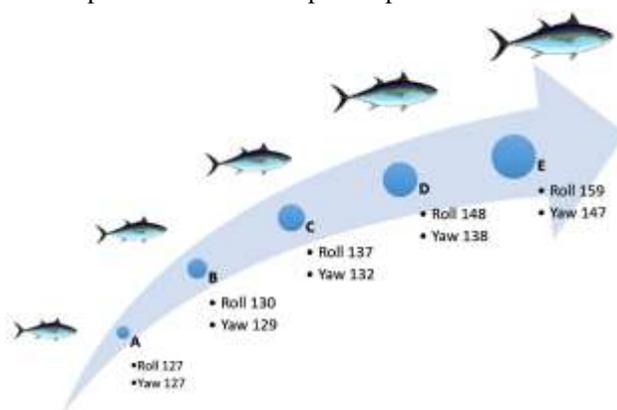
Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Figura 12: Datos de recibidos de la posición del pez vía Bluetooth



Posteriormente se realizó un Control PD para mejorar el funcionamiento del pez atún robot bioinspirado y que este controle su movimiento, brinde movimientos que permitan controlar la posición del pez y hacer que este se mantenga una trayectoria lineal. Las pruebas se van a realizar a una velocidad de los motores 70 a 120 rpm (la velocidad varía con el control PD) con lo cual tenemos un control de trayectoria tomado en cinco puntos diferentes.

Figura 13: Trayectoria de nado planificada en cinco puntos para la toma de datos del robot bioinspirado pez atún.



Durante las pruebas realizadas y ya implementado el Control PD, el controlador envía una señal a los motores (actuadores), con el objeto de corregir la velocidad y dirección del pez y así evitar que este salga de la trayectoria lineal. Se obtuvo la siguiente tabla:

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

Tabla 3: Datos obtenidos de la Trayectoria de nado planificada en cinco puntos del robot bioinspirado pez atún.

VALORES	ESPERADOS	POSICION OBTENIDA		ERROR	
ROLL	YAW	ROLL	YAW	ERROR ROLL	ERROR YAW
127	127	127	127	0	0
127	127	130	129	3	2
127	127	137	132	10	5
127	127	148	138	21	11
127	127	159	147	23	20

Los datos obtenidos en la tabla anterior son valores promediados durante la prueba de la Trayectoria de nado planificada en cinco puntos del robot bioinspirado pez atún. Para ello se obtuvieron 50 valores y se tabularon con la finalidad de dividir la trayectoria y poder mostrar el error de desviación de la misma.

Conclusiones

- Se diseñó e implementó un robot bioinspirado con la morfología de un pez atún, con dos grados de libertad, usando para estos dos micro servomotores sg90 impermeabilizados, un sistema de control con comunicación vía bluetooth, logrando así el desplazamiento deseado del robot, un desplazamiento uniforme propio del pez atún.
- Se realizó una serie de tres pruebas para identificar el sistema, tomando en cuenta para este la distancia recorrida en función del número de aletazos proporcionadas por la aleta caudal.
- Con las características de este robot bioinspirado se tiene varias áreas de aplicación, como son la industria, el medioambiente e incluso la educación.
- Al utilizar una unidad de medición inercial como es el MPU 6050 se tuvo problemas con el Control PD, ya que este no es preciso y no funciona como se espera, por lo que la precisión de la maniobra es muy escasa, lo que provocará bruscos movimientos (inestabilidad en el sistema) que radica en que el pez solo mantenga la trayectoria lineal por poco tiempo y luego el error del control crezca ocasionando que el pez ya no tenga una trayectoria lineal (controlada).

Recomendaciones

Al momento de realizar el diseño en SolidWorks es importante tomar como referencia la morfología del atún para que sea muy parecido al real.

Para futuros proyectos relacionados a los robots bioinspirados tomando en cuenta este documento, es importante cambiar de unidad de medición inercial que permita obtener con mayor precisión los datos del robot. Y que esta no interfiera con el correcto funcionamiento del controlador.

El prototipo se puede mejorar con un control PID que controle de mejor manera la trayectoria del robot.

Para mejorar el rendimiento de la IMU y evitar que interfiera con cualquier tipo de control, se puede aplicar un filtro, por ejemplo, el Filtro de Kalman que permite estimar variables de estado no observables a partir de variables observables que pueden contener algún error de medición.

Referencias

1. Arakeri, (2009) “Fluid mechanics of fish swimming,” *Resonance*, vol. 14, no. 1, pp. 32–46, 2009.
2. Astessiano, D., Romero, P. & Sensale, B., (2008) “Universidad de la República, Facultad de Ingeniería PROYECTO PEZ ROBOT,” pp. 1–98, 2008.
3. Cabrera, R., Santacruz, F. y Veloz, D. (2018) “Bio-inspired fish robot with Body and Caudal Fin Locomotion Subcaringiforme operated remotely using Bluetooth technology.,” *Investigar*, 2018.
4. Drucker, E., and Jensen, J. (1997) “Kinematic and electromyographic analysis of steady pectoral fin swimming in the surfperches,” *J. Exp. Biol.*, vol. 200, no. Pt 12, pp. 1709–1723, 1997.
5. Fierro, H., Gómez Espinosa, F. R., Gío-Argáez, & B. Buitrón, (2004) “Los que se niegan a desaparecer,” *Ciencia*, pp. 17–23, 2004.
6. Gilbert, D. (2004) “Quantitative Characterization of Three-Dimensional Pectoral Fin *Lepomis macrochirus*,” *Murj*, vol. 10, pp. 59–64, 2004.
7. Izaguirre, E., Hernández, L., Rubio, E., Prieto, P., & Urquijo, O. (2011) “Análisis cinemático y control articular aplicado a simulador de movimiento de estructura paralela,” *Rielac*, vol. Vol.XXXII, pp. 1–12, 2011.

Control de Trayectoria lineal del Robot pez bioinspirado en un atún con BCF

8. Lauder, G. (2011) "Swimming hydrodynamics: Ten questions and the technical approaches needed to resolve them," *Exp. Fluids*, vol. 51, no. 1, pp. 23–35, 2011.
9. Nguyen, Q., Heo, S., Park, H., & Byun, D. (2009) "Thrust improvement of an fish robot actuated by compressed unimorph piezoelectric composite actuator," 2009 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2009, pp. 1603–1608, 2009
10. Parra, M. (2016). "Diseño, Construcción y Evaluación de un Robot Cartesiano XYZ Electroneumático" p. 136, 2016.
11. Pedro, P., Guimarães¹, (2016) «IEEE Xplore,» 3Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://sci-hub.tw/10.1109/LARS-SBR.2016.17>.
12. Puglisi, I. Carrera, & Pedro, C. (2014) "Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control.," vol. 11, pp. 3–19, 2014.
13. Ruiz, V. "Peces (2007) "Generalidades sobre la biología clasificación " PECES: Generalidades sobre su biología y su clasificación" pp 260-300, 2007.
14. Standen, E., & Lauder, G. (2005) "Dorsal and anal fin function in bluegill sunfish *Lepomis macrochirus* : three-dimensional kinematics during propulsion and maneuvering," pp. 2753–2763, 2005.
15. Taft, N., Lauder, G., & Madden, P. (2008) "Functional regionalization of the pectoral fin of the benthic longhorn sculpin during station holding and swimming," *J. Zool.*, vol. 276, no. 2, pp. 159–167, 2008.
16. Universidad Politécnica de Madrid (2009) Biblioteca Universitaria," p. 2009, 2009.
17. USFQ, (2012) "Un Tesoro Por Explorar," 2012.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).