

Robot nadador con flagelo flexible basado en actuación única: Prueba de propulsión en condiciones de bajo número de Reynolds

Tejado, I.*, Rebollo-Gómez Coronado, J. A., Nuevo-Gallardo, C., Vinagre, B. M.

Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avenida de Elvas s/n, 06006, Badajoz, España.

To cite this article: Tejado, I., Rebollo-Gómez Coronado, J.A., Nuevo-Gallardo, C., Vinagre, B.M. 2023. Swimming robot with flexible flagellum based on single actuation: Testing motion at low Reynolds number conditions. XLIV Jornadas de Automática, 773-778. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.773>

Resumen

En entornos con bajo número de Reynolds (Re), los robots nadadores necesitan realizar movimientos no recíprocos para propulsarse. El método fundamental para lograr este tipo de movimiento es mediante la generación de ondas progresivas (también conocidas como ondas viajeras) que recorren el flagelo del robot desde la cabeza al extremo libre. Este trabajo se centra en una forma sencilla de generar ondas progresivas en condiciones de bajo Re que consiste en la oscilación periódica de un flagelo flexible pasivo. Para las pruebas de propulsión, se presenta un prototipo de robot nadador con actuación única basada en el mecanismo yugo escocés y palanca, que permite convertir el movimiento de rotación de un motor en una oscilación angular que viaja a lo largo del flagelo. Asimismo, se desarrolla en MATLAB un algoritmo basado en imágenes para identificar el movimiento realizado por el robot, es decir, para determinar las características del nadador en la propulsión. Los resultados experimentales demuestran que el robot es capaz de realizar un movimiento no recíproco en condiciones de bajo Re .

Palabras clave: Robot móvil, Flexible, Motor, Procesamiento de imágenes, Propulsión, Parámetros del movimiento.

Swimming robot with flexible flagellum based on single actuation: Testing propulsion at low Reynolds number conditions

Abstract

Within low Reynolds number (Re) environments, swimming robots need to perform non-reciprocal motions to propel themselves. The fundamental method to achieve this type of motion is by generating progressive waves (also known as traveling waves) that travel along the robot flagellum from the head to the free end. This work focuses on a simple way to generate progressive waves under low Re conditions that consists of the periodic oscillation of a passive flexible flagellum. For propulsion testing, a prototype of single-acting swimming robot based on the scotch-yoke-lever mechanism is presented, which allows to convert the rotational motion of a motor into an angular oscillation traveling along the flagellum. Also, an image-based algorithm is developed in MATLAB to identify the motion performed by the robot, i.e., to determine the characteristics of the swimmer in propulsion. Experimental results show that the robot is able to perform a non-reciprocal motion under low Re conditions.

Keywords: Mobile robot, Flexible, Motor, Image processing, Propulsion, Motion parameters.

1. Introducción

Con los avances tecnológicos en sensores y microfabricación, el campo de la microrobótica está recibiendo mucha atención en los últimos años. De hecho, el desarrollo de ciertos tipos

de microrobots es una realidad hoy en día, ofreciendo múltiples aplicaciones por, principalmente, la capacidad de acceder, recorrer y operar en zonas reducidas, tortuosas o con accesibilidad limitada. Entre otros, uno de los objetivos de los proyectos en los que se enmarca este trabajo es el diseño de mi-

*Autor para correspondencia: itejbal@unex.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

crorobots nadadores para aplicaciones médicas, de forma que sean capaces de navegar por el sistema circulatorio para realizar procedimientos médicos menos invasivos, administrar fármacos con mayor precisión, interactuar y manipular entidades diminutas del entorno, e incluso realizar tareas encaminadas al diagnóstico y la monitorización (Sitti et al., 2015; Li et al., 2017; Medina-Sánchez et al., 2018; Soto et al., 2020). Sin embargo, trabajar en la microescala implica afrontar un gran número de retos, empezando por entender la hidrodinámica, que se traduce en el movimiento en regímenes de bajo número de Reynolds (Re). En tales condiciones, las fuerzas de inercia son despreciables frente a las fuerzas viscosas, por lo que no pueden aplicarse los principios de actuación convencionales para la locomoción de los robots.

El análisis de las formas de nado a bajo Re ha sido ampliamente abordado en la literatura y desde diferentes perspectivas (véase, por ejemplo, Gagnon (2017); Jong (2015); Cohen and Boyle (2010); Garstecki and Cieplak (2009); Raz and Avron (2007) y referencias incluidas). Una de las tendencias actuales se basa en emular la locomoción de nadadores biológicos generando ondas progresivas mediante flagelos flexibles (Sudo, 2010). En concreto, la locomoción se puede abordar utilizando varios métodos: 1) por actuación distribuida (Traver et al., 2021; Mancha et al., 2018; Abadi and Kósa, 2016; Kósa et al., 2008), 2) por actuación en dos puntos (Prieto-Arranz et al., 2018; Hariri et al., 2013; Zhao, 2011), 3) por actuación en un único punto del extremo unido a la cabeza del robot (Prieto-Arranz et al., 2018; Hariri et al., 2013), o 4) con una distribución no uniforme de masas (López et al., 2018) o de elasticidad (Wang et al., 2021) en el flagelo. Los dos últimos métodos son los menos explotados en la literatura.

Teniendo en cuenta este contexto, este trabajo estudia una forma sencilla de generar ondas progresivas a bajo Re a partir de la oscilación periódica de un flagelo flexible pasivo. En concreto, se presenta un prototipo macroscópico (de varios centímetros) de un robot nadador formado por un flagelo flexible, un motor y el mecanismo yugo escocés y palanca en un fluido muy viscoso, garantizando condiciones de bajo Re dada la longitud del robot. Para determinar la forma de onda de la propulsión, se desarrolla en MATLAB un algoritmo capaz de analizar, fotograma a fotograma, el vídeo del movimiento del flagelo a partir de una serie de marcas sobre el flagelo. Se presentan resultados experimentales que demuestran que el robot es capaz de realizar un movimiento no recíproco en este entorno de bajo Re .

El resto del contenido de este documento se organiza como sigue. El apartado 2 resume las propiedades del entorno y la hidrodinámica asociada a los regímenes de bajo Re . El apartado 3 describe el prototipo de robot nadador con flagelo flexible con actuación única que se ha diseñado y fabricado. El apartado 4 presenta los experimentos llevados a cabo para demostrar que el robot es capaz de realizar un movimiento no recíproco en condiciones de bajo Re y los resultados obtenidos. Las conclusiones de este trabajo están resumidas en el apartado 5.

2. Movimiento a bajo número de Reynolds

El estudio de la propulsión en la microescala exige comprender la dinámica de los fluidos en el régimen de bajo Re . Para un fluido newtoniano, cuya viscosidad dinámica μ es cons-

tante para todas las condiciones, Re viene definido por la siguiente relación:

$$Re = \frac{vl\rho}{\mu} \quad (1)$$

donde v y l son la velocidad máxima y una dimensión característica del flujo, respectivamente, y ρ es la densidad del fluido. En la microescala, esta relación tiene un valor pequeño (bajo Re), situación que lleva a despreciar los términos inerciales frente a los viscosos. O dicho de otro modo, en condiciones de bajo Re , las fuerzas viscosas predominan frente a las inerciales (Happel and Brenner, 1983).

El estudio de la hidrodinámica en un fluido se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes, que definen las fuerzas que aparecen en un fluido en movimiento (White, 2011). En el caso de la microescala, estas ecuaciones se transforman en las ecuaciones de Stokes una vez se eliminan los términos de la inercia. Por otra parte, la ley de conservación de la masa puede aplicarse a cualquier elemento de volumen estacionario dentro de un fluido en movimiento (Happel and Brenner, 1983), dando lugar a la ecuación de continuidad. Para un fluido incompresible, la ecuación puede simplificarse a $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ y establece las ecuaciones del movimiento de fluencia para un régimen bajo de Re , junto con las ecuaciones de Stokes (Happel and Brenner, 1983). Si Re es pequeño, no hay fuerzas externas aplicadas al nadador y al fluido que lo rodea, por lo que ese término puede omitirse en las ecuaciones de Stokes, adoptando la forma cuasiestática siguiente:

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 \mathbf{v} &= \nabla p \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

donde ∇p es el gradiente de presión presente en el fluido, $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ representa la difusión y las fuerzas internas, y $\nabla \cdot \mathbf{v}$ es la tasa neta de flujo.

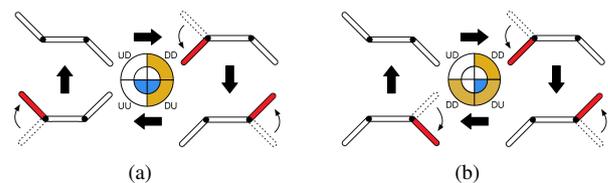


Figura 1: Tipos de movimiento: (a) no recíproco (b) recíproco.

Una consecuencia de las ecuaciones de Stokes es la reversibilidad de un flujo en régimen de bajo Re : si un cuerpo en movimiento genera flujo invirtiendo la misma secuencia, las partículas del fluido también siguen las mismas trayectorias. Debido a esto, Purcell introdujo el “teorema de la viera” (*scallop theorem*) (consúltese Purcell (1977)), que establece que un movimiento recíproco da lugar a una traslación neta nula en cada eje, es decir, un nadador que se desplaza a una posición y luego regresa invirtiendo la misma secuencia de formas no produce desplazamiento neto del mismo. En consecuencia, hay que realizar un movimiento no recíproco, definido por el desplazamiento de un cuerpo a lo largo de una trayectoria y el regreso implementando una secuencia de estados diferente. La Figura 1 ilustra la diferencia entre movimiento recíproco y no recíproco: si ‘U’ y ‘D’ denotan cuando el extremo de un segmento lateral del microrrobot es accionado hacia arriba y abajo,

respectivamente, la secuencia de movimientos codificada como UD→DD→DU→UU de la Figura 1(a) se corresponderá con un movimiento no recíproco (no se repite ninguna de ellas), mientras que secuencia UD→DD→DU→DD de la Figura 1(b) dará lugar a un movimiento recíproco (DD se repite). Por tanto, la selección de una secuencia no recíproca óptima es crucial para que el nadador se desplace en este entorno (Lauga and Powers, 2009).

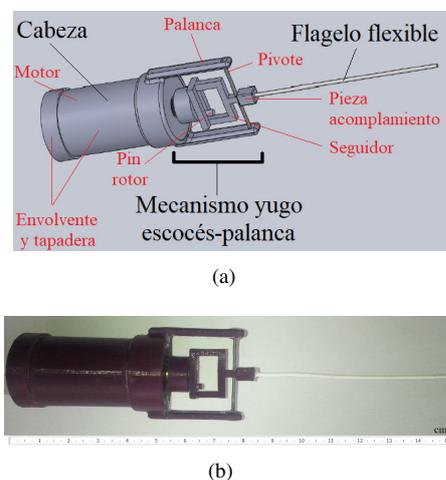


Figura 2: Robot nadador con flagelo flexible basado en actuación única: (a) diseño (b) prototipo fabricado.

3. Descripción del robot

La Figura 2 muestra el diseño y el prototipo fabricado de robot nadador con flagelo flexible y mecanismo de transmisión basado en yugo escocés y palanca. Como se puede ver en la Figura 2(a), el robot consta de las siguientes partes:

- Motor, que será el encargado de generar el par que será debidamente transmitido al flagelo. El motor utilizado es el modelo DC-MAX26S GB KL 24V del fabricante Maxon Motor, que lleva montado el encóder ENX16 EASY 1024IMP. Asimismo, se ha diseñado una envolvente y una tapadera que cumplen con la función protegerlo del exterior y garantizar la estanqueidad del prototipo. Los modelos 3D de estas piezas se muestran en la Figura 3 y han sido impresas en un impresora 3D. Se puede observar que la pieza envolvente tiene dos orificios (Figura 3(a)), uno para el eje del motor y el otro para la tapadera. Por su parte, la tapadera (Figura 3(b)) también tiene otro para dejar pasar los cables de alimentación y de datos del motor. El conjunto motor-envolvente-tapadera conforma lo que sería la cabeza del robot.
- Mecanismo de transmisión (yugo escocés y palanca), que transforma el movimiento de rotación del motor en el longitudinal del flagelo. Está formado, a su vez, por las siguiente piezas (véase la Figura 4): a) el rotor, que es el encargado de recibir el par motor a través del eje del motor y se conecta a él a través de una pequeña ranura circular que tiene justo en su centro; b) el conjunto palanca-seguidor, que recibe el movimiento del rotor y lo limita a un plano 2D con ayuda de la siguiente pieza; c) el pivote,

que es un cilindro que limita el movimiento; d) la envolvente, que permite sujetar el pivote y mantener alineado todo el mecanismo con el motor; y e) el acople para el flagelo, cuya única finalidad es la de servir de puente entre la salida del mecanismo yugo escocés y el flagelo y que puede ser fácilmente sustituible en el caso de querer utilizar otro tipo de flagelo sin necesidad de rediseñar el resto del mecanismo.

- Flagelo, de material flexible con sección circular de 1,75 mm de diámetro y de longitud 9,5 cm (en realidad, se trata de un fragmento de filamento flexible de una impresora 3D). Va fijado al mecanismo de transmisión a presión mediante la pieza de acople, aunque también lleva un pequeño refuerzo de pegamento de alta resistencia.

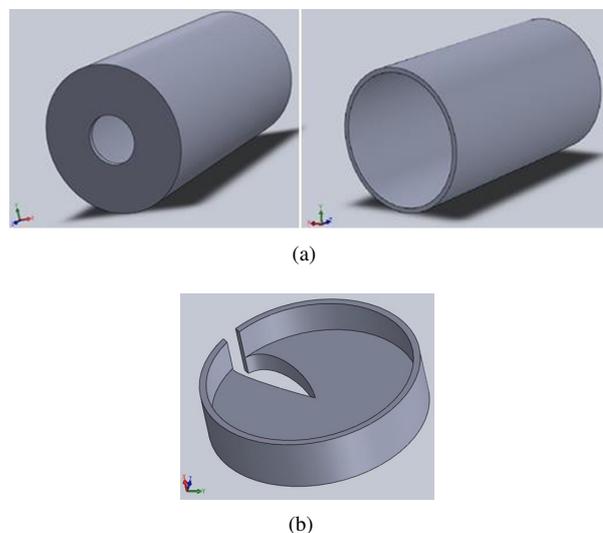


Figura 3: Detalle de las piezas protectoras del motor: (a) diferentes vistas de la pieza envolvente (b) tapadera.

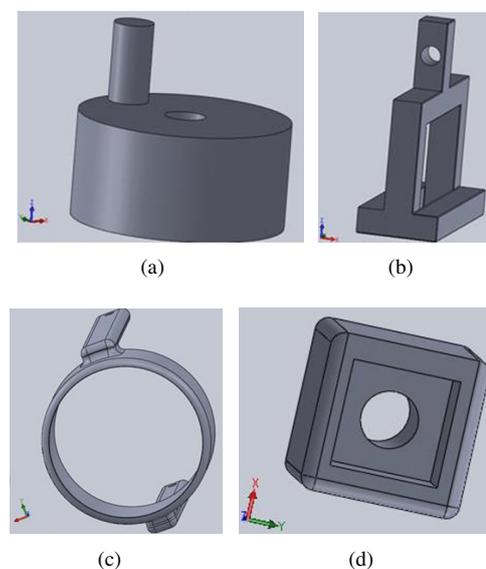


Figura 4: Detalle de las piezas del mecanismo de transmisión yugo escocés y palanca: (a) rotor (b) conjunto palanca-seguidor (c) envolvente (d) acople del flagelo.

Es importante señalar que, aunque el prototipo del robot nadador tiene una longitud de 15 cm, se utilizará un fluido muy viscoso en los experimentos para garantizar un bajo Re . En ese caso, los resultados que se obtengan serán extrapolables a un microrrobot (de longitud por debajo del milímetro) en el sistema circulatorio humano, por ejemplo.

4. Experimentos

Con el objetivo de verificar si el robot fabricado puede propulsarse en condiciones de bajo Re , se ha desarrollado un banco de pruebas experimental para identificar qué tipo de movimiento realiza mediante técnicas de visión por computador. Este apartado contiene la descripción de los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

4.1. Banco de pruebas

La Figura 5 muestra una vista lateral del montaje experimental, que está formado por:

- Un tanque, lleno de aceite de silicona (fluido altamente viscoso), que emula las condiciones en las que se encontraría el robot fabricado a escala micro en un entorno como el sistema cardiovascular.
- El robot nadador, en el que el flagelo se ha recubierto de cinta adhesiva negra. Asimismo, se ha utilizado cinta amarilla para marcar sobre él puntos de referencia al 20, 40, 60 y 80 % de su longitud (referidos en adelante como punto 1, punto 2, punto 3 y punto 4, respectivamente), que serán rastreados, fotograma a fotograma de un vídeo, para determinar el patrón de movimiento generado. Como puede observarse, únicamente se sumerge el flagelo del nadador, evitando así posibles problemas de estanqueidad con el motor, por lo que el flagelo se coloca de tal manera que el eje del motor queda perpendicular a la base del tanque.
- Una cámara externa, colocada de manera perpendicular al flagelo, para grabar el movimiento del flagelo en vídeo. En este caso, la cámara elegida es la Photron FASTCAM Mini UX, que permite grabar a una velocidad de hasta 2000 fotogramas por segundo (fps), aunque las grabaciones se han realizado a 500 fps (es decir, cada segundo de vídeo contiene 500 fotogramas). Con esto se garantiza el seguimiento de la posición de cada marca del flagelo con bastante precisión. Es importante resaltar tres cuestiones: 1) la cámara utilizada únicamente graba en ISO 10.000 monocromo, por lo que la diferenciación de colores en el flagelo debe ser evidente, de ahí que se usaran los colores negro y amarillo (este último también se usó como fondo de imagen); 2) el cuidado de la iluminación en la grabación del movimiento del robot es clave para garantizar el éxito del posprocesado del vídeo; 3) el algoritmo para detectar las marcas del flagelo se ha desarrollado en MATLAB mediante su herramienta *Computer Vision System*, tal y como se explica en el siguiente subapartado; y 4) se realizaron grabaciones por debajo de 500 fps, pero los resultados obtenidos fueron bastante pobres en cuanto a la detección de las marcas del flagelo.

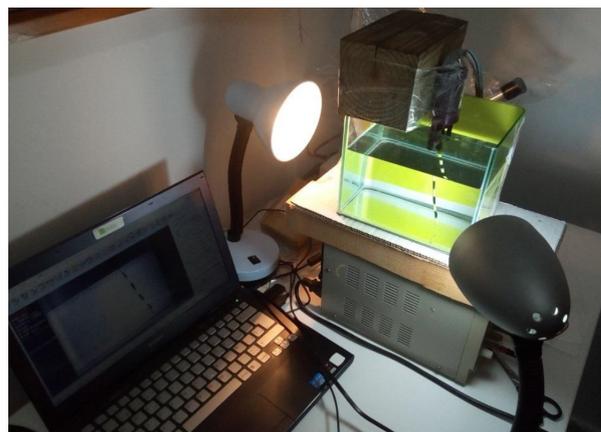


Figura 5: Banco de pruebas para experimentos con el prototipo de robot nadador fabricado.

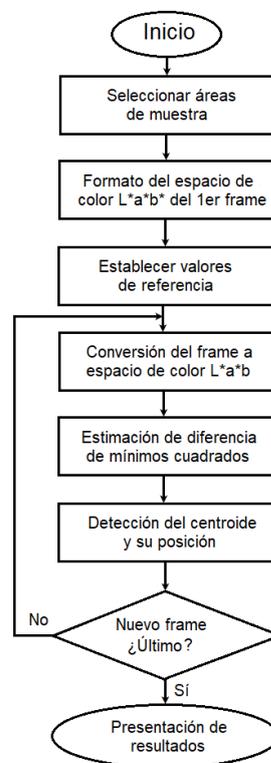


Figura 6: Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para detectar las cintas adhesivas adheridas a la superficie del flagelo.

4.2. Algoritmo de detección de marcas

Con el fin de detectar las marcas de color amarillo del flagelo (más concretamente, su centroide) e identificar el tipo de movimiento que realiza el robot, se ha desarrollado un script en MATLAB utilizando la segmentación basada en color utilizando el espacio de color $L^*a^*b^*$ (The MathWorks Inc., 2020). Como este procedimiento se realiza tras el experimento (es decir, *offline*), primero es necesario grabar en vídeo el movimiento del robot. Cada fotograma se procesa siguiendo el algoritmo que se describe a continuación y que se encuentra resumido en la Figura 6:

1. Selección de regiones de muestra. Se seleccionan regiones del primer fotograma donde predomine un tipo de color, guardándose su posición para posteriores operaciones. Aún no se toman valores de color de ningún tipo. Así, por ejemplo, para el primer fotograma las regiones de mayor interés son: el color blanco (en monocromo) de los puntos de interés del flagelo, el color negro adyacente y los colores grisáceos del fondo. Basta con tomar una muestra de cada uno de ellos.
2. Transformación a formato $L^*a^*b^*$. Se convierte este primer fotograma de un marco rojo-verde-azul (RGB) a espacio de color $L^*a^*b^*$ para facilitar el proceso de detección. El formato $L^*a^*b^*$ asigna a cada píxel la información de su color utilizando tres valores diferentes: L^* para los niveles de iluminosidad, a^* para el gradiente de rojo a verde y b^* para el gradiente de azul a amarillo.
3. Estimación del valor medio del color $L^*a^*b^*$ de los píxeles que estén dentro de cada una de las regiones de muestra, que se guardan como valores de referencia.
4. Procesamiento del resto de fotogramas del vídeo. Tras el procesamiento del primer fotograma, se inicia un proceso cíclico con el resto de fotogramas que se divide en los siguientes pasos:

- Transformación a formato $L^*a^*b^*$.
- Diferencia por mínimos cuadrados entre cada píxel del fotograma y cada uno de los valores de referencia anteriormente mencionados de la siguiente forma:

$$\delta_{i,j} = \sqrt{(a_{i,j} - a_{avg})^2 + (b_{i,j} - b_{avg})^2} \quad (3)$$

donde (i, j) denota las coordenadas del píxel del fotograma analizado, $a_{i,j}$ y $b_{i,j}$ son los píxeles de los canales "a" y "b" en formato $L^*a^*b^*$, respectivamente, mientras que a_{avg} y b_{avg} se refieren al valor medio de los canales "a" y "b" de la muestra, respectivamente. A partir de aquí, se construye una matriz tridimensional con las diferencias obtenidas para cada uno de los colores.

- Detección y localización del centroide: se calculan los mínimos de dicha matriz y se hace corresponder cada mínimo con la etiqueta del color.
5. Presentación de resultados, en formato vídeo. En aquellos fotogramas en los que se pierda la posición de alguno de los puntos, bien debido a que la iluminación de la cámara no sea la más adecuada, o bien porque el flagelo oscile a frecuencias demasiado elevadas, se realiza una interpolación para la estimación del dato perdido.

Es importante tener en cuenta que:

1. Cada píxel tiene información de luminosidad (" L "), gradiente de color verde-rojo (" a ") y gradiente azul-amarillo (" b ").
2. Solo se requiere guardar las diferencias $\delta_{i,j}$ en una matriz de 720×1080 , una matriz por color, y buscar aquellos puntos con los valores más pequeños.

3. El centroide del color deseable debe estimarse y almacenarse en una matriz $m \times n$ para poder seguir estos puntos de referencia de fotograma a fotograma, donde n denota el punto de referencia y m el fotograma que se está procesando.
4. Este algoritmo fue validado para una configuración de experimentos más sencilla; concretamente, para una barra flexible accionada mediante un motor sumergida también en un tanque con aceite de silicona. Consúltese López et al. (2018) para más información.

4.3. Resultados

Se han llevado a cabo dos tipos de experimentos con el robot: en el aire y en el tanque con aceite de silicona.

Los resultados tras el procesamiento del vídeo en el primero de los casos se muestran en la Figura 7, mientras que la Figura 8 contiene los correspondientes al tanque. Como se puede observar en las Figuras 7(a) y 8(a), en el frame inicial se distinguen las cuatro partes del flagelo. Por su parte, la detección del centroide de cada parte se representa en las Figuras 7(b) y 8(b). Estos resultados permiten validar el algoritmo de procesamiento desarrollado para esta aplicación.

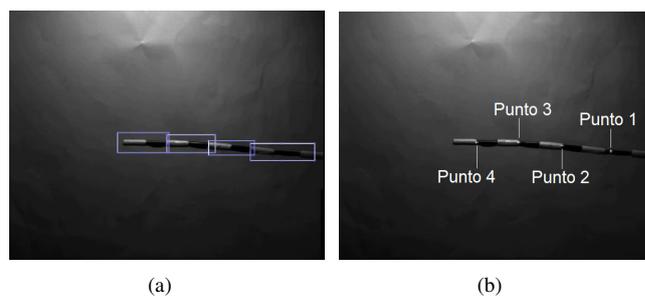


Figura 7: Resultados tras aplicar el algoritmo de procesamiento de imágenes (experimentos en el aire): (a) frame inicial con las partes de interés marcadas sobre el flagelo (b) detección de puntos.

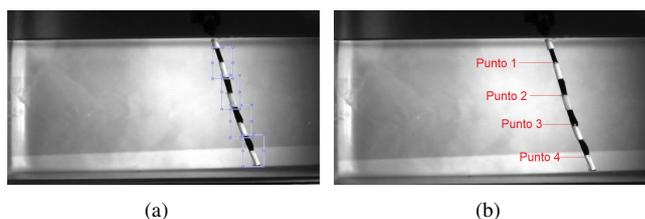


Figura 8: Resultados tras aplicar el algoritmo de procesamiento de imágenes (experimentos en aceite de silicona): (a) frame inicial con las partes de interés marcadas sobre el flagelo (b) detección de puntos.

La Figura 9 muestra el desplazamiento de cada uno de los puntos del flagelo, en píxeles, para los experimentos en el aire y en aceite de silicona. Del análisis del movimiento del flagelo en el aire (Figura 9(a)), se desprende que, por un lado, los puntos de mayor desplazamiento corresponden a los más alejados de la cabeza del robot y, por otro, el desplazamiento de los puntos mantiene una simetría evidente (todos pasan por cero en el mismo frame). Dicho de otro modo, el comportamiento del flagelo en este caso es similar al de una barra rígida y el movimiento generado es recíproco. Por tanto, la configuración actual del

robot no permitiría su propulsión en el aire. Sin embargo, si se analiza el movimiento del flagelo en el interior del tanque (Figura 9(b)), el desplazamiento de los puntos ya no es simétrico (no pasan por cero en el mismo frame), por lo que en este caso el movimiento generado es no recíproco, que sí permitiría la propulsión del robot.

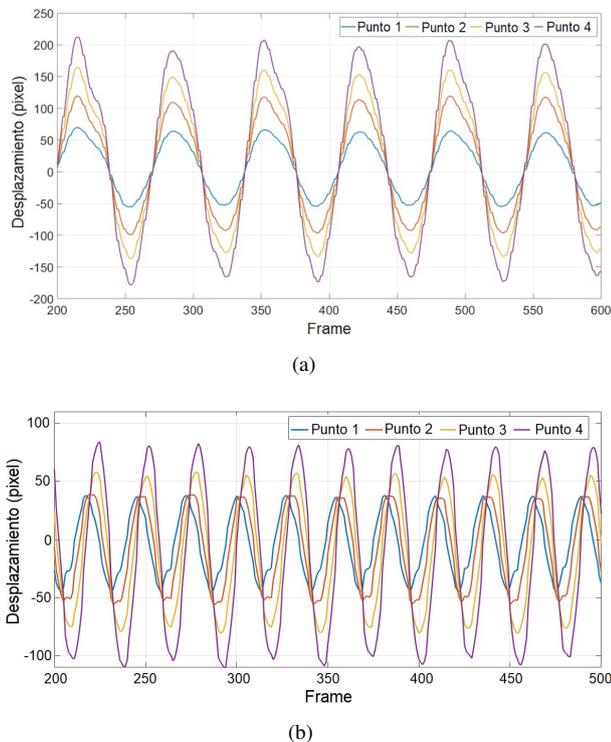


Figura 9: Desplazamiento de los cuatro puntos del flagelo situados en el 20, 40, 60 y 80 % de su longitud para experimentos en: (a) aire (b) aceite de silicona.

5. Conclusiones

Este trabajo ha presentado un prototipo de robot nadador con actuación única basada en el mecanismo yugo escocés y palanca como forma sencilla de generar ondas progresivas en condiciones de bajo Re mediante la oscilación periódica de un flagelo flexible pasivo. Para la validación del tipo de movimiento generado por el robot se ha desarrollado un algoritmo basado en imágenes en MATLAB, que ha permitido demostrar que el nadador fabricado a escala micro sería capaz de propulsarse en un entorno como el sistema circulatorio humano.

Como trabajo futuro, se tratará de reducir el tamaño del nadador y hacer experimentos de propulsión completamente sumergido en el fluido.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto PID2019111278RB-22/AEI/10.13039/501100011033, por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura a través del proyecto IB18109 y de las “Ayudas a Grupos de Investigación de Extremadura”, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) “Una manera de hacer Europa”.

Referencias

- Abadi, A., Kósa, G., 2016. Piezoelectric beam for intrabody propulsion controlled by embedded sensing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 21 (3), 1528–1539.
- Cohen, N., Boyle, J. H., 2010. Swimming at low Reynolds number: a beginners guide to undulatory locomotion. *Contemporary Physics* 51 (2), 103–123.
- Gagnon, D. A., 2017. Locomotion at low Reynolds number: Dynamics in Newtonian and non-Newtonian systems with biomedical applications. Ph.D. thesis, University of Pennsylvania.
- Garstecki, P., Cieplak, M., 2009. Swimming at low Reynolds numbers—motility of micro-organisms. *Journal of Physics: Condensed Matter* 21, 200301.
- Happel, J., Brenner, H., 1983. *Low Reynolds number hydrodynamics*, 2nd Edition. Martinus Nijhoff Publishers.
- Hariiri, H., Bernard, Y., Razek, A., 2013. A traveling wave piezoelectric beam robot. *Smart Materials and Structures* 23 (2), 025013.
- Jong, C. S., 2015. *Fluid Mechanics: Foundations and Applications of Mechanics*. Cambridge University Press, Ch. Low-Reynolds Number Hydrodynamics, pp. 352–380.
- Kósa, G., Jakab, P., Hata, N., Jólesz, F., Neubach, Z., Shoham, M., Zaaroor, M., Székely, G., 2008. Flagellar swimming for medical micro robots: theory, experiments and application. In: *Proceedings of the 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2008)*, pp. 258–263.
- Lauga, E., Powers, T. R., 2009. The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics* 72 (9), 096601.
- Li, J., Esteban-Fernández de Ávila, B., Gao, W., Zhang, L., Wang, J., 2017. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics* 2 (4).
- López, M. A., Prieto, J., Traver, J. E., Tejado, I., Vinagre, B. M., Petráš, I., 2018. Testing non reciprocal motion of a swimming flexible small robot with single actuation. *Proceedings of the 19th International Carpathian Control Conference (ICCC 2018)*, 312–317.
- Mancha, E., Traver, J. E., Tejado, I., Prieto, J., Vinagre, B. M., Feliu, V., 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 693. Springer, Ch. Artificial Flagellum Microrobot. Design and Simulation in COMSOL, pp. 491–501.
- Medina-Sánchez, M., Xu, H., Schmidt, O. G., 2018. Micro- and nano-motors: the new generation of drug carriers. *Therapeutic Delivery* 9 (4), 303–316.
- Prieto-Arranz, J., Traver, J. E., López, M. A., Tejado, I., Vinagre, B. M., 2018. Study in COMSOL of the generation of traveling waves in an AEF robot by piezoelectric actuation. *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, 748–755.
- Purcell, E. M., 1977. Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics* 45 (1), 3–11.
- Raz, O., Avron, J. E., 2007. Swimming, pumping and gliding at low Reynolds numbers. *New Journal of Physics* 9.
- Sitti, M., Ceylan, H., Hu, W., Giltinan, J., Turan, M., Yim, S., Diller, E., 2015. Biomedical Applications of Untethered Mobile Milli/Microrobots. *Proceedings of the IEEE* 103 (2), 205–224.
- Soto, F., Wang, J., Ahmed, R., Demirci, U., 2020. Medical Micro/Nanorobots in Precision Medicine. *Advanced Science* 7, 2002203.
- Sudo, S., 2010. Biomimetics Learning from Nature. InTech, Ch. MicroSwimming Robots Based on Small Aquatic Creatures, pp. 343–362.
- The MathWorks Inc., 2020. Color-Based Segmentation Using the L*a*b* Color Space. URL: <https://es.mathworks.com/help/images/examples/color-based-segmentation-using-the-l-a-b-color-space.html>
- Traver, J. E., Tejado, I., Nuevo-Gallardo, C., López, M. A., Vinagre, B. M., 2021. Performance study of propulsion of n-link artificial eukaryotic flagellum swimming microrobot within a fractional order approach: From simulations to hardware-in-the-loop experiments. *European Journal of Control* 58, 340–356.
- Wang, T., Ren, Z., Hu, W., Li, M., Sitti, M., 2021. Effect of body stiffness distribution on larval fish-like efficient undulatory swimming. *Science Advances* 7 (19), eabf7364.
- White, F. M., 2011. *Fluid Mechanics*. Mc Graw-Hill, 7th edition.
- Zhao, C., 2011. *Ultrasonic Motors: Technologies and Applications*. Springer.