

CONTROL DE VELOCIDAD DE MICRORROBOT AUTÓNOMO MOVIDO POR CABECEO CON FLAGELO PASIVO

E. Mancha-Sánchez*, A. J. Serrano, I. Tejado, B.M. Vinagre

Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales,

Avda de Elvas s/n, 06006 Badajoz, España {emancha*,ajserranob,itejbal,bvinagre}@unex.es

Resumen

La robótica médica ha pasado de ser el futuro a estar entre nosotros en nuestro día a día. Existe una robótica médica más disruptiva, y con menos uso, por el momento, la microrrobótica. Existen multitud de aproximaciones a la hora de realizar un microrrobot. En este trabajo hemos realizado el modelo matemático inicial y el diseño de dos controladores para controlar la velocidad de un microrrobot autónomo movido por cabeceo con un flagelo pasivo acoplado. Mediante Simulink se han realizado estudios del modelo con distintos parámetros de entrada (simulando el empuje realizado mediante reacciones químicas) y el control de su velocidad. Se ha obtenido un modelo inicial que servirá de punto de partida para un modelo más completo. Además se realizó un prototipo funcional a escala.

Palabras clave: Microrrobótica, reacciones químicas, control de velocidad

1. INTRODUCCIÓN

La robótica ya no es sólo una disciplina del futuro en la medicina, sino que se ha convertido en una de las mayores ayudas para los médicos actuales. Este crecimiento viene dado por una combinación de avances en tecnología mecánicas, electrónicas y de materiales, dando una mayor confianza para su utilización a médicos y pacientes. La robótica médica puede verse actuando ya en muchos hospitales de todo el mundo, cuyo uso está demostrado que reduce los tiempos de estancia en el hospital de los pacientes operados con la ayuda de estos dispositivos [7]. Pero la robótica médica no sólo se basa en la cirugía más “tradicional”, sino que engloba a otro tipo de mecanismos o máquinas como los microrrobots, robots de escala microscópica usados para ser introducidos en el organismo y realizar diversas actuaciones. Entre estas actuaciones destaca su uso como sistema de sensorización [5], liberación de fármacos de forma controlada y dirigida [4] y la cirugía mínimamente invasiva, como biopsias, laparoscopias o colocación de implantes [8]. Estos microrrobots, debido a su pequeño tamaño, se ven influidos

de distinta manera en el aspecto físico que en la macroescala, ya que las fuerzas inerciales se hacen insignificantes, tomando mayor importancia las fuerzas viscosas. Esto provoca un cambio en el enfoque de la gestión y requerimientos energéticos y en los métodos de fabricación, el control y la locomoción de estos dispositivos.

Existen multitud de estrategias a la hora de alimentar al microrrobot. Según cómo se aplique la energía en los microrrobots y cómo se dirijan se distinguen dos tipos: Microrrobots autónomos y no autónomos. Los microrrobots no autónomos, necesitan de la energía aplicada de forma externa para poder propulsarse. Este tipo de microrrobots son, por el momento los más utilizados, ya que es más sencillo, fabricarlos, controlarlos, y guiarlos. Dentro de este sistema de obtención de energía, destaca el sistema de actuación magnético, radiación infrarroja, ultrasonidos, o mediante campos eléctricos[9]. Los microrrobots autónomos utilizan energía del entorno o almacenada internamente en forma de baterías. La energía obtenida del entorno suele provenir de reacciones químicas, gradientes de pH o temperatura. En el caso de las reacciones químicas éstas las provoca el contacto de elementos inorgánicos como metales nobles, como el *Au* o el *Pt*, o el *Mg* y el *Zn*, con un ácido, el H_2O_2 , o el agua de la sangre, generando burbujas de gases que sirven de propulsión. Del mismo modo, la utilización de enzimas y sustratos del propio organismo se puede conseguir el mismo efecto de propulsión. Entre estas enzimas destacan la catalasa, la ureasa y la glucosa oxidasa, que utilizan compuestos presentes en la sangre para generar burbujas de gases [10]. Este sistema de utilización de energía es el más prometedor, ya que permite obtener la energía directamente del medio. Pero presenta diversas complicaciones, como la disponibilidad en el medio del sustrato, o la manera de controlar su uso.

La energía debe ser convertida en movimiento. La mayor parte de los mecanismos de propulsión suelen fijarse en los sistemas biológicos, ya sean macroscópicos, como los peces [3], o

microscópicos, como los flagelos bacterianos o los espermatozoides [2]. Independientemente del sistema de energía utilizado, el microrrobot tiene que poder desplazarse de una manera u otra. Generalmente, los microrrobots alimentados por reacciones químicas se desplazan únicamente por la generación de burbujas. Inspirados en el flagelo bacteriano, existen microrrobots que poseen un propulsor helicoidal para su locomoción. El método más habitual es la utilización de un motor que hace rotar un flagelo pasivo. De otra forma, también se puede utilizar un flagelo activo que genere una onda progresiva para generar la propulsión. Este tipo de propulsión suele ser más efectiva en términos de propulsión que el flagelo helicoidal, pero es más difícil de implementar, alimentar y controlar. La utilización de células, bacterias, o componentes celulares directamente como sistema de locomoción es otra estrategia emergente.

El objetivo de este trabajo es, partiendo de la simulación computacional de un microrrobot con flagelo actuado por propulsión química, desarrollar el modelo matemático inicial y un controlador que nos permita controlar su velocidad. Además de la construcción de un prototipo en la macroescala.

2. DESCRIPCIÓN DEL MICRORROBOT

En trabajos anteriores se realizaron simulaciones computacionales de un microrrobot compuesto por una cabeza tipo elipsoide y un flagelo ([6]). En ellas se observó que la aplicación de fuerzas a los lados del microrrobot de manera alterna generaba un balanceo y un movimiento de deriva, y que con la presencia del flagelo, este movimiento se amortiguaba. Además del amortiguamiento provocado por el flagelo, éste generaba un impulso adicional, mejorando así la eficiencia del movimiento (Figura 1). Partiendo de estos resultados se propone realizar el modelo matemático simplificado de este mismo microrrobot.

2.1. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático del microrrobot mencionado se simplificó de manera inicial eliminando el flagelo (Figura 2). Por lo tanto en este modelo se cuenta con el desplazamiento en x e y y el ángulo de la cabeza (θ). De este modo, las ecuaciones de movimiento del microrrobot se pueden escribir como:

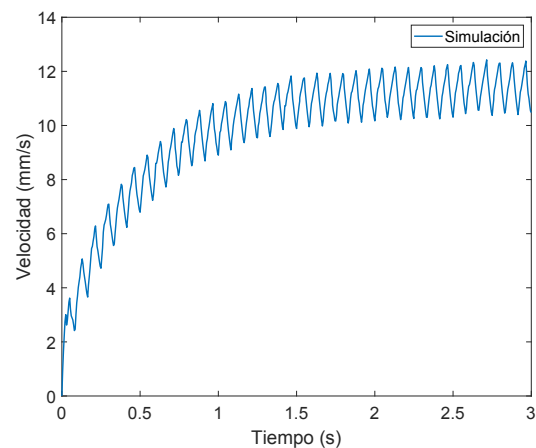


Figura 1: Resultados de simulaciones previas donde se observa la velocidad del microrrobot y la forma de la onda

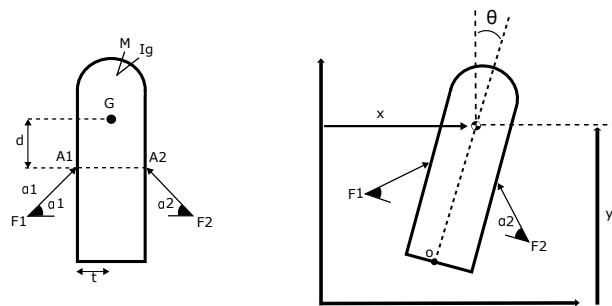


Figura 2: Diagrama de cuerpo libre del microrrobot. Parámetros mostrados en la Tabla 1

$$F_1 \cos(\alpha_1) - F_2 \cos(\alpha_2) - M\ddot{x} = 0 \quad (1)$$

$$F_1 \sin(\alpha_1) + F_2 \sin(\alpha_2) - Mg - M\ddot{y} = 0 \quad (2)$$

$$F_1 \cos(\alpha_1)d - F_2 \cos(\alpha_2)d - F_1 \sin(\alpha_1)t + F_2 \sin(\alpha_2)t + I_G\ddot{\theta} = 0 \quad (3)$$

siendo F_1 y F_2 las fuerzas aplicadas en el microrrobot, α_1 y α_2 los ángulos de las fuerzas con respecto al cuerpo, d y t las distancias en x e y desde el centro de gravedad a las fuerzas, M la masa, I_G el momento de inercia, y g la gravedad.

Para una primera aproximación se consideraron como variables de estado únicamente la posición en el eje y , la velocidad en y (\dot{y}), el ángulo de la cabeza (θ) y la velocidad angular ($\dot{\theta}$). El vector de estado del sistema linealizado z es:

$$z = [z_1, z_2, z_3, z_4]^T = [y, \dot{y}, \theta, \dot{\theta}]^T \quad (4)$$

Las entradas del modelo son:

$$u = [F1, F2, g]^T \quad (5)$$

Tabla 1: Parámetros del diseño del modelo

Parámetro	Valor
d	32 mm
t	28 mm
M	400 g
α_1 y α_2	$\pi/4$ rad
I_g	$1,88 \cdot 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
ρ	$1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Las ecuaciones en espacio de estado se pueden escribir como:

$$\dot{z} = Az + Bu \tag{6}$$

$$y = Cz + Du \tag{7}$$

donde:

$$\dot{z} = [\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_4]^T \tag{8}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= y & z_3 &= \theta \\ z_2 &= \dot{z}_1 = \dot{y} & z_4 &= \dot{z}_3 = \dot{\theta} \\ \ddot{z}_2 &= \ddot{z}_1 = \ddot{y} & \ddot{z}_4 &= \ddot{z}_3 = \ddot{\theta} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_2 \\ \ddot{y} \\ z_4 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \tag{10}$$

De este modo:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Linealizando, obtenemos las siguientes matrices del sistema:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sin(\alpha_1)}{M} & \frac{\sin(\alpha_2)}{M} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{-d\cos(\alpha_1)+t\sin(\alpha_1)}{I_G} & \frac{d\cos(\alpha_2)-t\sin(\alpha_2)}{I_G} & 0 \end{bmatrix}$$

Se puede observar cómo el desplazamiento en y y el ángulo de la cabeza (θ) se encuentran desacoplados, relacionándose únicamente por la entrada.

2.2. MODELO DE SIMULACIÓN

Partiendo del modelo matemático linealizado se simuló el sistema en Simulink (Figura 3). Las señales de entrada se modelaron como ondas senoidales para hacer que las hélices del microrrobot oscilen sobre una velocidad media, una de las señales de entrada se desfasó (Figura 4). A este sistema, como inicialmente se le retiró el flagelo, se le incluyó una componente de fricción, en forma de fuerza de fricción dependiente del área de contacto del microrrobot, la densidad del medio y de la velocidad.

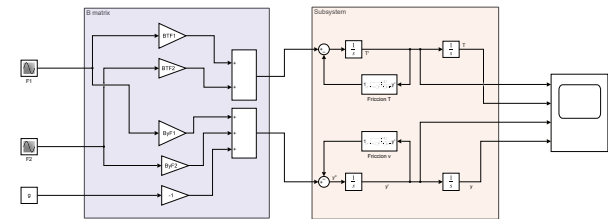


Figura 3: Diagrama de Simulink del modelo linealizado

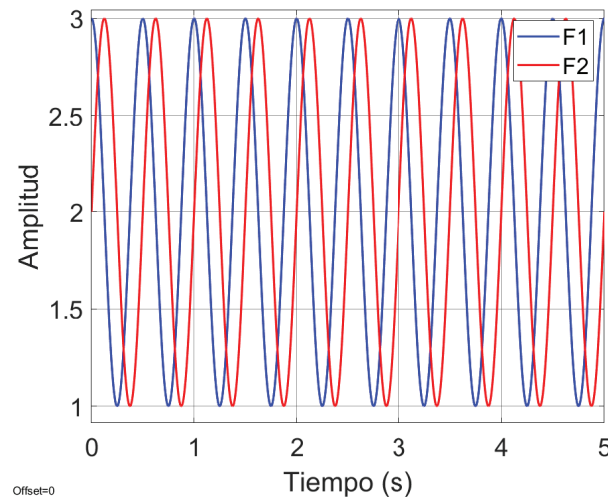


Figura 4: Representación de la forma de las señales de entrada al modelo

2.3. PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Se realizó un prototipo en la macroescala del microrrobot (Figura 5). Para ello se fabricó el cuerpo mediante Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling (FDM)). Se utilizaron dos motores Pololu con encoders a los que se le acoplaron dos hélices para generar la propulsión. Se utilizó un Arduino Nano 33 IoT conectado con Simulink por WiFi para generar la señal de los motores. A cada uno de los motores se les excitaba con una señal senoidal similar a las utilizadas en el modelo matemático. Simulink manda la señal

mediante un protocolo UDP vía WiFi y recibe la señal de los encoders, mediante el mismo protocolo (Figura 6).

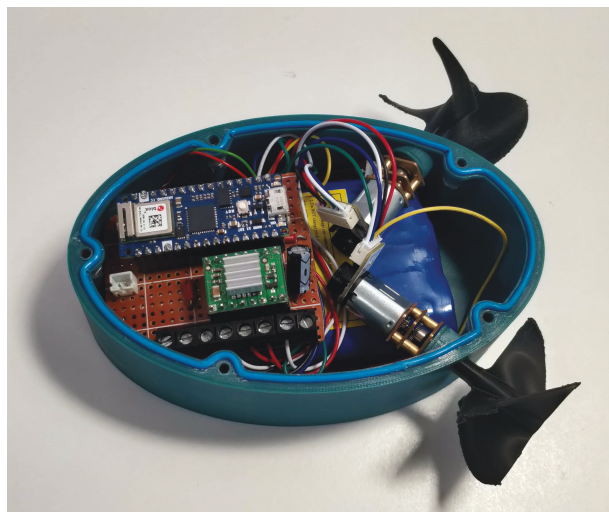


Figura 5: Prototipo

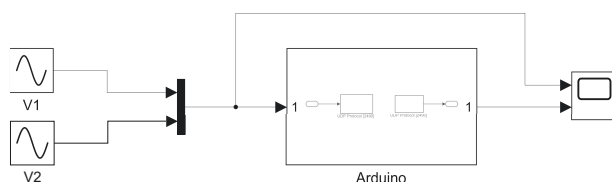


Figura 6: Modelo Simulink para la conexión del Arduino. V1 y V2 son las señales enviadas a los motores

3. DISEÑO DEL CONTROL

Para un mejor entendimiento del efecto de los parámetros y variables sobre la respuesta dinámica de la velocidad (v) se muestra a continuación la expresión de la velocidad en el dominio del tiempo. Se ha obtenido a partir de la ecuación (2) y considerando que las fuerzas de entrada son dos senoides de la misma amplitud, desfasadas un ángulo ϕ y con un sesgo positivo de dos veces la amplitud (2A):

$$F_1 = A \sin(\omega t + \phi) + 2A, F_2 = A \sin(\omega t) + 2A \quad (12)$$

$$v(t) = \frac{A}{R^2 + \omega^2} (B_1 R \sin(\omega t + \phi) - B_1 \omega \cos(\omega t + \phi) + B_2 R \sin(\omega t) - B_2 \omega \cos(\omega t)) - \frac{2A(B_1 + B_2)}{R} + e^{-Rt} \left(-\frac{2A(B_1 + B_2)}{R} - \frac{A}{R^2 + \omega^2} (B_2 \omega - B_1 R \sin(\phi) + B_1 \omega \cos(\phi)) \right) \quad (13)$$

Como se deduce a partir de la ecuación (13), se observa en su representación (Figura 7) y se ve en los resultados obtenidos con la simulación del modelo en Simulink (4.1), la amplitud de las senoides de entrada va a determinar la velocidad media del microrobot, así como la amplitud de las oscilaciones.

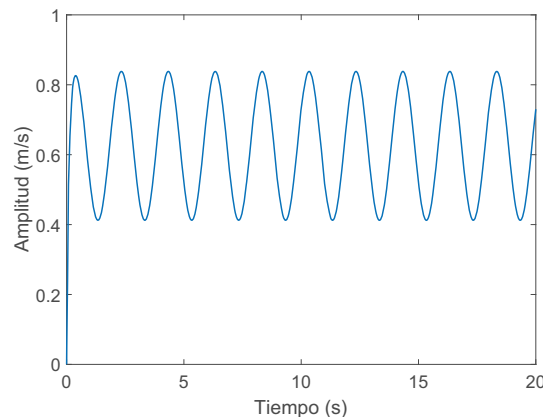


Figura 7: Representación de la velocidad según la ecuación 13

Se diseñó un controlador para controlar únicamente la velocidad del microrobot (v) y se montó en Simulink (Figura 8). Partiendo de la ecuación de la velocidad:

$$\dot{v} + Rv = B_1 A \sin(\omega t + \phi) + B_2 A \sin(\omega t) \quad (14)$$

siendo B_1 y B_2 parámetros del sistema, R el factor de amortiguamiento, dependiente de la sección del robot y de la densidad del líquido, y ω y ϕ los parámetros de frecuencia y desfase de la onda de entrada.

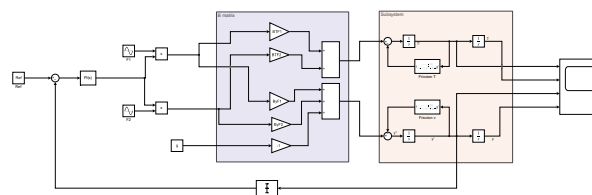


Figura 8: Modelo de Simulink con el controlador PI

Se utilizó un controlador PI:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (15)$$

siendo e el error del sistema, definido como:

$$e(t) = v_{ref} - \bar{v}(t) \quad (16)$$

y \bar{v} es la media, calculada como:

$$\bar{v}(t) = \frac{\int_{t_0}^t v(t) dt}{t - t_0} \quad (17)$$

Al considerar el control unicamente para la velocidad y siendo los ángulos de aplicación de las fuerzas $\alpha_1 = \alpha_2$, las constantes B_1 y B_2 son iguales. Por lo tanto, la función de transferencia del sistema $G(s)$ es:

$$G(s) = \frac{B/R}{1/Rs + 1} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (18)$$

Obteniendo para nuestro modelo:

$$G(s) = \frac{0,1563}{0,088s + 1} \quad (19)$$

El controlador PI se diseñó mediante dos métodos distintos, para así poder comparar cuál de los dos se ajustaba mejor a nuestros requerimientos. Se usaron el método de sintonía lambda y el lugar de las raíces.

Mediante el método de sintonía lambda [1], se nos permite obtener una respuesta en lazo cerrado críticamente amortiguada. Con ello, la función de transferencia del controlador es:

$$C(s) = \frac{K_p(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (20)$$

Por este método, se elige $T_i = T = 0,088$, y $\lambda \leq 4T$. En concreto para una λ de 0,1 se obtienen los valores de $K_p = 5,65$, y $K_i = 11,3$. Siendo:

$$K_p = \frac{T}{\lambda K} \quad (21)$$

En segundo lugar, el controlador se diseñó mediante el lugar de las raíces. La representación del lugar de las raíces es la que se muestra en la Figura 9. En ella se determina la ubicación del cero, que se coloca a la izquierda del polo del sistema para que éste se vea atraído y sea más rápido. Así, se ha determinado la ganancia que nos proporciona un menor tiempo de respuesta y oscilación. Obteniendo unas constantes K_p y K_i de 11,93 y 148,49, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SIMULINK

Para el modelo en Simulink se realizó una simulación inicial utilizando los parámetros mostrados en la Tabla 1. Como se observa en la Figura 10, con los parámetros utilizados, se produce un balanceo continuo del microrrobot a una velocidad que oscila sobre cero. También puede observarse un desplazamiento del microrrobot en el eje y a una velocidad que oscila sobre un

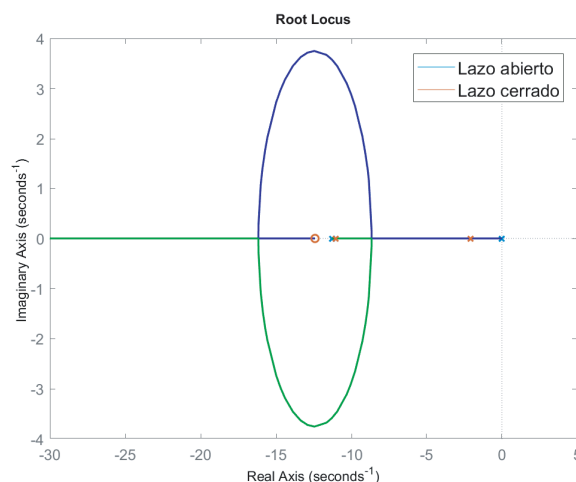


Figura 9: Lugar de las raíces del sistema en lazo abierto y lazo cerrado

valor. Para el modelo sin control se estudiaron cómo los parámetros de frecuencia y amplitud en las señales de entrada afectan a la velocidad del modelo (Figura 10). Al aumentar la frecuencia de la entrada aumenta el número de oscilaciones por segundo en la velocidad del microrrobot (Figura 11). Del mismo modo, se produce una disminución en la amplitud de la velocidad. No así la velocidad media, que en todos los casos se mantiene constante. Por otro lado, la amplitud de los senos de entrada afecta al tamaño de los rizados de la salida, concretamente el aumento de la amplitud hace aumentar la velocidad angular máxima, el ángulo máximo, la velocidad lineal media, y la distancia recorrida. Como se observa en la Figura 12, al aumentar la amplitud la velocidad media aumenta de manera directamente proporcional.

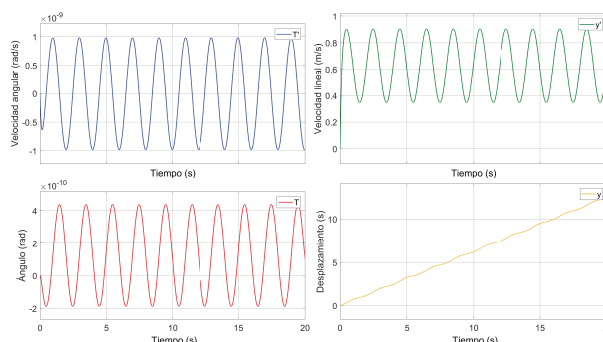


Figura 10: Resultados de velocidad angular ($\dot{\theta}$), ángulo (θ), velocidad lineal (\dot{y}), y desplazamiento (y)

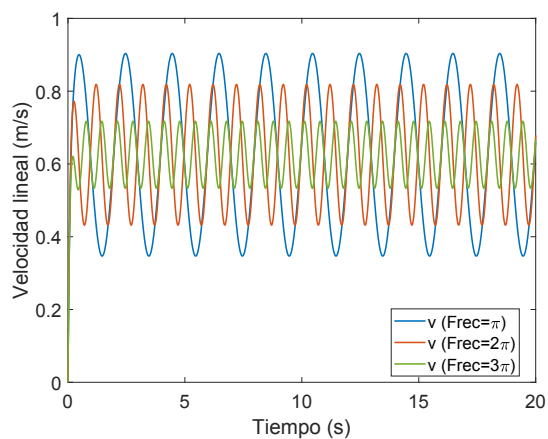


Figura 11: Resultados de la velocidad al modificar la frecuencia (Frec=frecuencia)

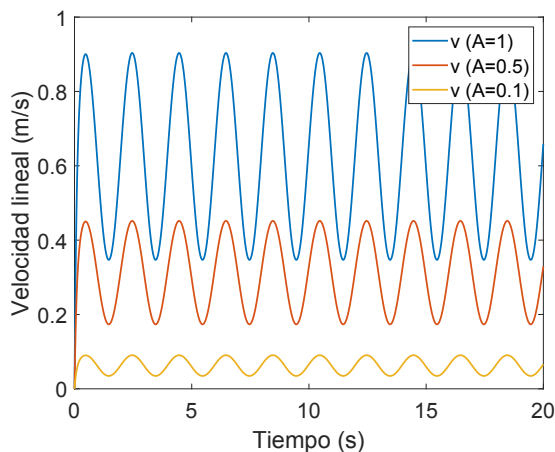


Figura 12: Resultados de la velocidad al modificar la amplitud (A=amplitud)

4.2. CONTROLADOR

Se probaron los controladores diseñados mediante simulaciones en Simulink utilizando el modelo simplificado, con los parámetros mostrados en la Tabla 2. Ambos controladores demuestran ser lo suficientemente robusto como para ser utilizado para controlar la velocidad media de nuestro microrrobot. Sin embargo, el diseño mediante sintonía lambda (Figura 13) presenta menor rapidez y mayor amplitud, aunque conserva la forma de onda de manera más parecida que la obtenida por el controlador diseñado mediante el lugar de las raíces. Éste controlador demuestra ser mucho más rápido y es capaz de amortiguar las oscilaciones de la velocidad. (Figura 14). Ambos controladores, al controlar únicamente la velocidad y sólo a través de la amplitud muestran efectos no deseados en el ángulo del microrrobot (Figura 15), haciendo que éste se acumule. Esta acumulación es más eviden-

te en el diseño mediante sintonía lambda. Este efecto provoca que el giro del microrrobot se vaya acentuando, provocando un desplazamiento no deseado.

Tabla 2: Resumen de los parámetros del modelo controlado

Parámetro	Valor
Amplitud (A)	1
Frecuencia	π rad
Fase (ϕ)	$\pi/4$ rad
Ángulos α_1 y α_2	$\pi/4$ rad
K_p (Sintonía λ)	5,65
K_i (Sintonía λ)	11,3
K_p (Lugar de las raíces)	11,93
K_i (Lugar de las raíces)	148,49

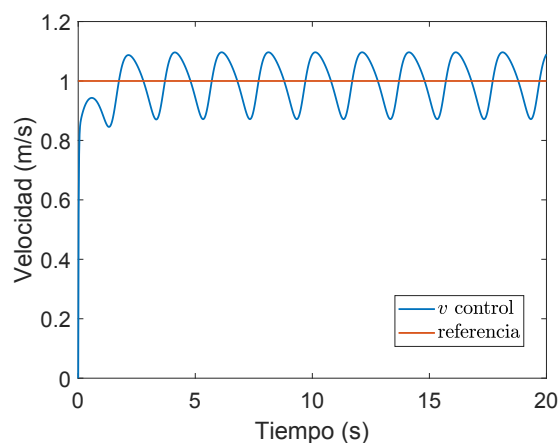


Figura 13: Velocidad controlada mediante el método de sintonía lambda y la referencia

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el modelo matemático de un microrrobot impulsado por reacciones químicas con un flagelo pasivo. El modelo se simplificó inicialmente retirándole el flagelo y añadiéndole en su lugar una fuerza resistiva (dependiente del medio y el área del microrrobot). Se le añadieron las señales de entrada en forma de ondas senoidales, que oscilan en positivo. Para este modelo se diseñó un controlador PI con el objetivo de controlar la velocidad lineal mediante dos métodos distintos. Con ambos métodos se consiguió controlar la velocidad del microrrobot, con el primer método (sintonía λ), se obtuvo una respuesta más lenta y un ángulo de inclinación no deseado. Por el contrario, mediante el segundo método utilizado (lugar de las raíces) se obtuvo una respuesta mucho más rápida y una eliminación acusada de las oscilaciones en la velocidad.

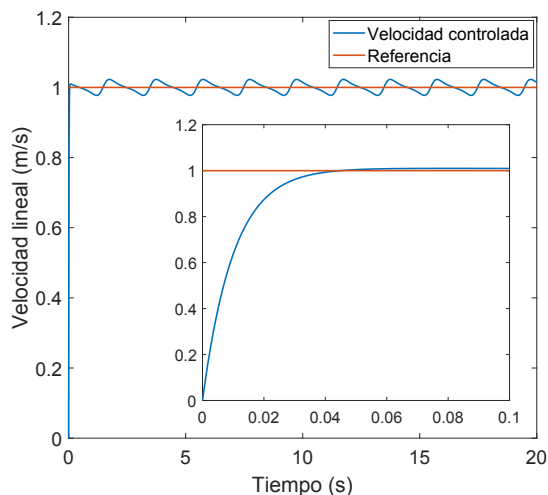


Figura 14: Velocidad controlada mediante el lugar de las raíces y la referencia. Detalle en el recuadro de la respuesta en los primeros 0,1 s

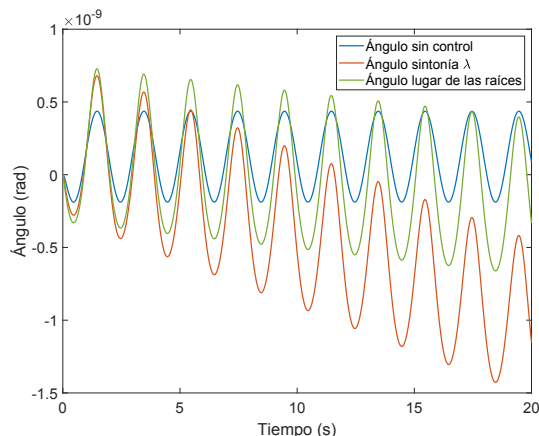


Figura 15: Ángulo de la cabeza en el modelo sin controlar y en los controlados por los dos métodos

Es necesario un estudio más profundo para desarrollar el controlador más adecuado, controlar la frecuencia de la entrada, no sólo la amplitud, así como controlar el ángulo de la cabeza. Por otro lado añadir el desplazamiento en el eje x al sistema ampliaría las posibilidades de control en el futuro, pudiendo realizar un control de posición. Además, añadirle al modelo matemático el flagelo serviría para poder validar las simulaciones realizadas y compararlo con el prototipo real realizado. Por último, en un trabajo ya en curso, mediante el prototipo fabricado se probará el modelo desarrollado. Además, se obtendrán medidas de aceleraciones de los sensores del prototipo para obtener parámetros que nos permitan controlarlo de manera eficaz.

Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura mediante el proyecto IB18109 y la “Ayuda a Grupos” GR18159, por la Agencia Estatal de Investigación mediante el proyecto PID2019-111278RB-C22 / AEI / 10.13039/501100011033, y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

English summary

SPEED CONTROL OF AUTONOMOUS PITCH-DRIVEN MICRO-ROBOT WITH PASSIVE FLAGELLUM

Abstract

Medical robotics has gone from being the future to being part of our daily lives. There is a more disruptive medical robotics, and with less use, for the moment, microrobotics. There are a multitude of approaches when it comes to making a microrobot. In this work we have carried out the initial mathematical model and the design of two controllers to control the speed of an autonomous pitch-driven microrobot with a passive flagellum attached. Simulink has been used to study the model with different input parameters (simulating the thrust produced by chemical reactions) and to control its speed. An initial model has been obtained that will serve as a starting point for a more complete model. In addition, a functional prototype was made to scale.

Keywords: Microrobotics, chemical reactions, speed control.

Referencias

- [1] K. J. Astrom and T. Hägglund, Advanced PID control, vol. 26, no. 1. 2006.
- [2] B. Chen, S. Jiang, Y. Liu, P. Yang, and S. Chen, “Research on the Kinematic Properties of a Sperm-Like Swimming Micro Robot,” *J. Bionic Eng.*, vol. 7, pp. S123-S129, 2010.
- [3] S. Heo, T. Wiguna, H. C. Park, and N. S. Goo, “Effect of an Artificial Caudal Fin on

- the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators,” *J. Bionic Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 151–158, 2007.
- [4] D. Jang, J. Jeong, H. Song, and S. K. Chung, “Targeted drug delivery technology using untethered microrobots: a review,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 29, no. 5, p. 053002, May 2019.
- [5] L. Kong, J. Guan, and M. Pumera, “Micro- and nanorobots based sensing and biosensing,” *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 10, pp. 174–182, 2018.
- [6] E. Mancha Sánchez, P. Rodríguez, A. Bravo, I. Tejado, and B. M. Vinagre, “Propulsión y dirección de un microrrobot tipo flagelo flexible utilizando la analogía del cohete. Simulación en COMSOL Multiphysics,” in *XLII JORNADAS DE AUTOMÁTICA : LIBRO DE ACTAS*, Servizo de Publicacións da UDC, 2021, pp. 461–468.
- [7] G. Marchand et al., “Systematic review and meta-analysis of all randomized controlled trials comparing gynecologic laparoscopic procedures with and without robotic assistance,” *Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol.*, vol. 265, pp. 30–38, 2021.
- [8] B. Sun, G. Wood, and S. Miyashita, “Milestones for autonomous in vivo microrobots in medical applications,” *Surg. (United States)*, vol. 169, no. 4, pp. 755–758, 2021.
- [9] B. Wang, K. Kostarelos, B. J. Nelson, and L. Zhang, “Trends in Micro-/Nanorobotics: Materials Development, Actuation, Localization, and System Integration for Biomedical Applications,” *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 4, pp. 1–44, 2021.
- [10] J. Zhang, Z. Chen, R. K. Kankala, S. Bin Wang, and A. Z. Chen, “Self-propelling micro-/nano-motors: Mechanisms, applications, and challenges in drug delivery,” *Int. J. Pharm.*, vol. 596, no. January, p. 120275, 2021.



© 2022 by the authors.
Submitted for possible
open access publication
under the terms and conditions of the Creative
Commons Attribution CC-BY-NC 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).