

SỰ ẢNH HƯỞNG CỦA LỰC KÍCH THÍCH ĐẾN ỨNG XỬ ĐỘNG LỰC HỌC CỦA ROBOT DẠNG VIÊN NANG

THE EFFECT OF EXCITATION FORCE ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A CAPSULE ROBOT

Ngô Quốc Huy¹,
Nguyễn Văn Dự¹, Hoàng Tiến Đạt^{2,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.124>

TÓM TẮT

Robot dạng viên nang được phát triển hướng tới các ứng dụng nội soi chuẩn đoán, phẫu thuật và phân phối thuốc điều trị các bệnh về đường tiêu hóa. Nguyên lý rung - va đập được khai thác để tạo khả năng tự chuyển động có thể điều khiển cho các viên nang. Lực kích thích dao động tạo rung là yếu tố quan trọng quyết định đến khả năng hoạt động của robot, cũng như thiết bị cấp phát đi kèm. Báo cáo này trình bày các kết quả đánh giá ảnh hưởng của dạng xung, tần số, cường độ lực kích thích, khoảng thời gian cấp xung tín hiệu trong một chu kỳ đến ứng xử động lực học của một mô hình robot viên nang. Viên nang được đề xuất mô hình vật lý, xây dựng mô hình toán và lựa chọn các thông số ban đầu. Phần mềm XPPauto được sử dụng để tìm lời giải số cho mô hình toán, phục vụ việc đánh giá hiệu quả làm việc của viên nang đề xuất. Các kết quả phân tích động lực học cho thấy sự ảnh hưởng mạnh của dạng tín hiệu xung, tần số, biên độ, độ rộng xung của lực kích thích đến hiệu quả làm việc của viên nang. Kích thích chế độ IC2 giúp viên nang chuyển động nhanh hơn. Bằng cách khảo sát số này cho phép người thiết kế xác định được các thông số làm việc tối ưu, giảm thời gian và chi phí khi xây dựng hệ thống thực nghiệm kiểm chứng cho viên nang.

Từ khóa: Robot dạng viên nang, hệ thống tự di chuyển nhờ rung, rung - va đập, tự di chuyển, viên nang nội soi.

ABSTRACT

Capsule robots or capsulobots are developed towards endoscopic diagnostic applications, surgery and drug delivery to treat gastrointestinal diseases. The vibro-impact principle is exploited to enable self-moving, controlled movement of the capsules. The force that stimulates vibration to create vibration is an important factor that determines the ability of the robot to operate, as well as the accompanying dispensing device. This report presents the results of evaluating the influence of pulse shape, the frequency, the amplitude of excitation force, the duty cycle values on the dynamic behavior of a capsule robot model. The physical model of the capsule is proposed, the mathematical model is built and the initial parameters are selected. XPPauto software is used to find numerical solutions for the mathematical model, supporting to evaluate the performance of the proposed capsule. The results of dynamic analysis show the strong influence of the pulse signal form, frequency, amplitude, and duty cycle of the excitation force on the capsule's working efficiency. This way allows to find the optimal working parameters, reduce the time and cost of designing experimental models for capsule model verification.

Keywords: Capsule robot, vibration driven locomotion system, vibro-impact, self-moving, endoscopic capsules.

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

²Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: hoangdat@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2025

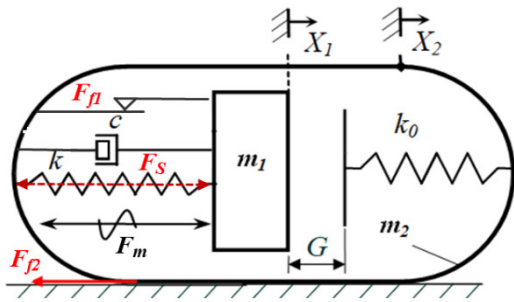
Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. GIỚI THIỆU

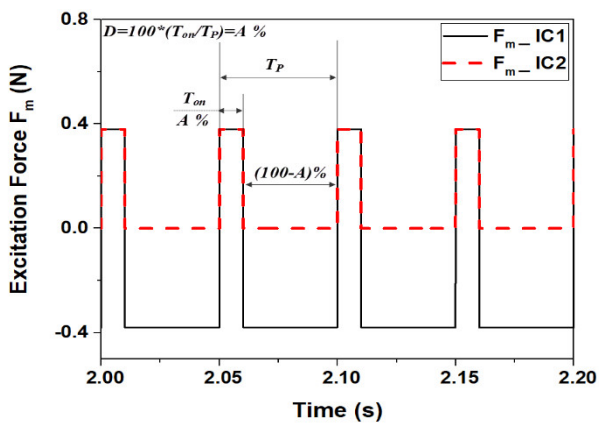
Capsule robot (còn gọi là capsulobot), là một thiết bị dạng viên nang trơn nhẵn, thường mang theo các modul chụp và gửi hình ảnh, giúp hỗ trợ nội soi chuẩn đoán các

bệnh về đường tiêu hóa. Capsulobot được nhiều hãng sản xuất thương mại phát triển như OMOM, Pillcam, Mirror cam... [1, 2]. Các thiết bị này được bệnh nhân nuốt vào qua đường thực quản, sau đó dịch chuyển dưới tác dụng của

trọng lực và nhu động thành ống tiêu hóa. Trên đường dịch chuyển, viên nang sẽ chụp lại hình ảnh và gửi ra thiết bị thu nhận bên ngoài. Viên nang nội soi này làm việc bị động, không thể điều khiển, nên bị hạn chế về khả năng quan sát hay tiếp cận vị trí cần chuẩn đoán. Để thực thi tốt các yêu cầu về chuẩn đoán, điều trị viên nang cần có khả năng chủ động dịch chuyển dưới tác dụng của tín hiệu điều khiển bên ngoài, mà không cần dây dẫn vật lý theo kèm.



(a)



(b)

Hình 1. Mô hình vật lý thiết bị tự di chuyển nhờ rung và đập dạng viên nang (a) và 02 chế độ lực kích thích F_m với $i_0 = 0,5A$; $G = 2\text{mm}$; $D = 0,2 = 20\%$

Bên cạnh giải pháp dùng từ trường ngoài điều khiển cường độ (kéo, đẩy, định hướng) viên nang [3-6], hướng nghiên cứu khai thác hiệu ứng rung động kết hợp va đập của khối lượng bên trong với vỏ viên nang được nhiều nhóm tác giả quan tâm [7-14]. Thiết bị dạng này có thể điều khiển được hoạt động, có thể bao kín trong dạng viên nang trơn nhẵn, có xung và đập lớn giúp thắng lực cản lớn từ môi trường làm việc, phù hợp với sự phát triển các viên nang tự di chuyển cỡ nhỏ, hướng đến ứng dụng nội soi. Mô hình vật lý cơ bản của viên nang tự di chuyển nhờ rung động kết hợp va đập được minh họa như hình 1. Trong đó, liên kết giữa khối lượng m_1 với vỏ m_2 được mô hình bằng lò xo có độ cứng k và hệ số cản nhớt c . F_s là đại lượng đặc trưng cho lực đàn hồi tương tác liên kết

giữa m_1 và m_2 . Ma sát chuyển động tương đối giữa m_1 và m_2 được kể đến thông qua lực F_{f1} và F_{f2} mô tả lực ma sát cản của robot với môi trường. Đại lượng độ cứng k_0 được sử dụng để mô tả đặc tính va đập giữa m_1 và m_2 . G là khoảng cách khe hở va đập (impact gap). X_1 và X_2 lần lượt là chuyển vị tuyệt đối của khối lượng m_1 và m_2 .

Lực kích thích dao động cho khối lượng m_1 là F_m phụ thuộc vào cách thức tạo và dạng tín hiệu kích thích (Sine/Square/Halfsine...). Lực này kết hợp với xung và đập giữa m_1 và m_2 sẽ giúp thắng lực cản từ môi trường lên vỏ viên nang. Cơ cấu chấp hành (Actuator) hay bộ tạo dao động (Vibrator) được sử dụng để tạo lực kích thích dao động, nhờ biến đổi năng lượng được cung cấp thành dao động cơ của khối lượng bên trong (m_1) so với vỏ (m_2). Từ đó, vỏ m_2 sẽ tương tác với môi trường tạo dịch chuyển cho viên nang. Cho đến nay, nguyên lý cơ bản thường được áp dụng cho cơ cấu chấp hành bộ tạo rung là sử dụng tương tác lực điện-từ để tạo chuyển động thẳng của khối lượng dịch chuyển m_1 . Các thiết bị chính dùng nguyên lý này khá phong phú trong các nghiên cứu gần đây, bao gồm ống dây solenoid [15, 16], động cơ lệch tâm [17-19], bộ tạo rung cơ điện [10, 20], hoặc động cơ tuyến tính [21-23]... Các bộ tạo dao động dạng này cho thấy kích thước còn khá cồng kềnh, cần dây dẫn điện để truyền năng lượng, có khả năng gây cản trở chuyển động. Mặc dù, thiết bị có kích cỡ lớn thì thuận tiện cho việc lắp đặt các thiết bị đo hỗ trợ quá trình thực nghiệm, nhưng đây là trở ngại, khó phát triển cho ứng dụng robot dạng viên nang cỡ nhỏ. Những yêu cầu quan trọng của bộ tạo rung là nguyên lý tạo rung, giới hạn về mặt kích thước và nguồn cấp năng lượng cũng như khả năng điều khiển hoạt động. Xét về các khía cạnh này, động cơ tuyến tính là thiết bị cho thấy nhiều ưu điểm về khả năng ứng dụng cho bộ tạo rung. Trong đó, lò xo liên kết giữa khối lượng dao động và vỏ, còn có tác dụng giúp hồi chuyển động cho khối lượng dao động, có thể là lõi thép từ hoặc nam châm trụ vĩnh cửu phân cực theo chiều trục. Khi dòng điện chạy qua cuộn dây sẽ sinh ra từ trường, hút lõi thép hoặc nam châm vĩnh cửu bên trong. Khi ngắt điện hoặc đảo chiều dòng điện thì đảo hướng chuyển động của lõi. Lực đàn hồi của lò xo sẽ hỗ trợ cho việc kích thích dao động cho khối lượng lõi m_1 .

Lực kích thích dao động F_m sẽ được đặc trưng bởi các thông số: dạng xung tín hiệu, cường độ, tần số và độ rộng xung kích thích D . D được xác định bằng tỉ số giữa thời gian tác động xung T_{on} và thời gian trong một chu kỳ kích thích T_p . Các yếu tố này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng khả năng hoạt động của cơ hệ viên nang. Bài báo

này trình bày các kết quả đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố lực kích thích đến ứng xử động lực học của thiết bị tự di chuyển dạng robot viên nang. Kết quả khảo sát sẽ giúp lựa chọn kiểu lực kích thích, xây dựng thiết bị cấp phát và điều khiển tín hiệu giúp cho viên nang hoạt động hiệu quả. Đây là cơ sở để phát triển các hệ thống thực nghiệm kiểm chứng và hướng đến ứng dụng nội soi y tế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để tiến hành nghiên cứu, bước đầu tiên là xây dựng mô hình toán mô tả cho mô hình vật lý của viên nang trên hình 1, biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 X_1}{dt^2} = F_m - F_s - c \cdot V_{rel} - H \cdot F_{imp} - F_{f1} \\ m_2 \frac{d^2 X_2}{dt^2} = -F_m + F_s + c \cdot V_{rel} + H \cdot F_{imp} - F_{f2} + F_{f1} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $()'$ là đạo hàm theo thời gian $d()/dt$; $V_{rel} = (X_1' - X_2')$ là vận tốc tương đối giữa các khối lượng m_1 và m_2 . Trong báo cáo này, thành phần lực kích thích dao động F_m cho khối lượng m_1 được biểu diễn dưới hai dạng tín hiệu lần lượt là hàm sóng xung chữ nhật (Rectangular wave), (ký hiệu là **IC1** - Initial Condition 1) và hàm sóng xung được nâng lên (offset) trên trục hoành một lượng bằng $F_0/2$, còn gọi là Pulse (ký hiệu là **IC2**) như minh họa trên hình 1b. Các chế độ lực kích thích sẽ được thiết lập bằng cách thay đổi biên độ lực kích thích, tần số và độ rộng xung D.

$$\begin{cases} F_m = F_0 \cdot \text{sign}[\sin(2\pi f \cdot t + \text{asin}(\cos(\pi D)) - (\cos(\pi D)))] \quad (\text{IC1}) \\ F_m = F_0 \cdot \text{heav}[\sin(2\pi f \cdot t + \text{asin}(\cos(\pi D)) - (\cos(\pi D)))] \quad (\text{IC2}) \end{cases} \quad (2)$$

Lực va đập giữa khối lượng m_1 với bích chặn F_{imp} được biểu diễn dưới dạng:

$$F_{imp} = k_0 \cdot (X_1 - X_2 - G) \quad (3)$$

Lực đàn hồi của lò xo liên kết giữa m_1 và m_2 có quan hệ với lượng dịch chuyển tương đối X_{rel} :

$$F_s = k \cdot (X_1 - X_2) \quad (4)$$

Hàm Heviside được sử dụng để mô tả trạng thái xảy ra va đập giữa m_1 và m_2 như phương trình:

$$H = \begin{cases} 1, & \text{if } (X_1 - X_2 - G) > 0 \\ 0, & \text{if } (X_1 - X_2 - G) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

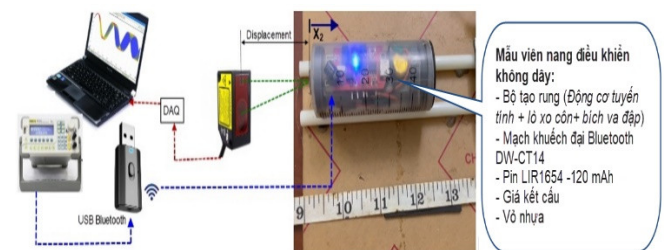
Các thành phần lực ma sát F_{f1} và F_{f2} được biểu diễn theo dạng ma sát Coulomb:

$$\begin{cases} F_{f1} = m_1 \cdot g \cdot \mu_1 \cdot \text{sign}(X_1' - X_2') \\ F_{f2} = (m_1 + m_2) \cdot g \cdot \mu_2 \cdot \text{sign}(X_2') \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó: f là tần số tín hiệu kích thích dao động (Hz); t là thời gian (s); g là gia tốc trọng trường $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$.

μ và μ_1 lần lượt là hệ số ma sát Coulomb giữa viên nang với môi trường và giữa khối lượng lõi m_1 với vỏ m_2 của robot. Trong đó, biên độ lực kích thích F_0 phụ thuộc vào hệ số đặc trưng cho dạng cơ cấu chấp hành biến dao động điện thành dao động cơ tuyến tính. Để thuận lợi cho việc khảo sát, báo cáo này sử dụng một động cơ tuyến tính thương mại có mã hiệu LVCM-013-32-02 của hãng Moticont, có hằng số biến đổi lực $BL = 0,76 \text{ N/A}$. Biên độ lực kích thích $F_0 = BL \cdot i_0 \text{ (N)}$, với i_0 là cường độ dòng điện cấp cho cuộn dây của động cơ.

Bước tiếp theo là xác định khoảng giá trị của các thông số ban đầu cho cơ hệ viên nang để xuất. Để thuận lợi cho việc khảo sát và kiểm chứng thực tế, mô hình viên nang được xây dựng sử dụng bộ tạo rung LVCM, một lò xo côn tuyến tính để nối lõi và vỏ dao động. Nguồn pin Lithium được dùng để cấp nguồn cho mạch khuếch đại và cho cuộn dây của động cơ tuyến tính. Tín hiệu điều khiển được thiết lập về dạng sóng, giá trị điện áp, tần số kích thích và mức độ rộng xung D bằng một máy phát hàm, nối đến một USB Bluetooth để truyền không dây đến bộ phận nhận của mạch khuếch đại DW-CT14 bên trong robot. Dữ liệu về chuyển vị của viên nang có thể được xác định bằng cảm biến khoảng cách không tiếp xúc (Laser sensor distance HG-C1200). Dữ liệu đo có thể thu thập vào máy tính. Giải pháp thiết kế này sẽ giúp loại bỏ dây dẫn vật lý, giảm thiểu tác hại lên thành ống tiêu hóa cũng như khả năng cản trở chuyển động.



Hình 2. Hệ thống thiết bị điều khiển không dây cho mô hình viên nang

Sau đó, phần mềm XPPAuto sẽ được sử dụng làm công cụ số để xác định lời giải cho mô hình toán để xuất. Để có thể tiến hành công việc tìm lời giải số, các tham số trong hệ (1) cần được định danh và lựa chọn khoảng khảo sát. Các thông số thiết lập ban đầu được xác định và lựa chọn trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số kết cấu và vận hành cho mô hình capsuobot được khảo sát

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị tính
Khối lượng dao động	m_1	0,007	kg
Khối lượng capsuobot	m_2	0,033	kg

Khoảng khe hở và đập	G	0,002	M
Cường độ dòng điện kích thích	i_0	0,2 - 1,0	A
Hệ số ma sát trượt giữa m_2 và môi trường	μ	0,25	-
Hệ số ma sát trượt giữa m_1 và m_2	μ_1	0,15	-
Độ cứng của lò xo côn	k	178,19	N/m
Hệ số cản	c	0,1736	Ns/m
Độ cứng va chạm	k_0	$98 \cdot 10^4$	N/m
Tần số kích thích	f	10 - 40	Hz
Độ rộng xung kích thích	D	20 - 80	%

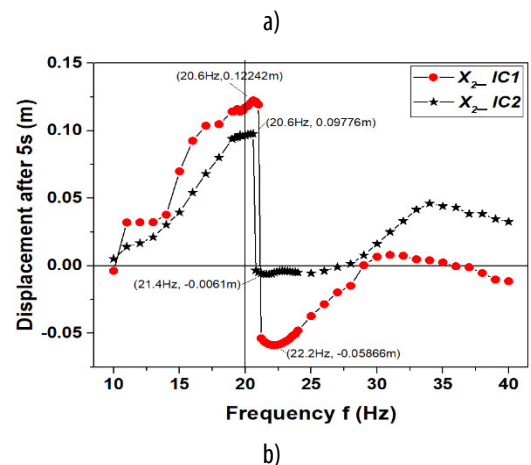
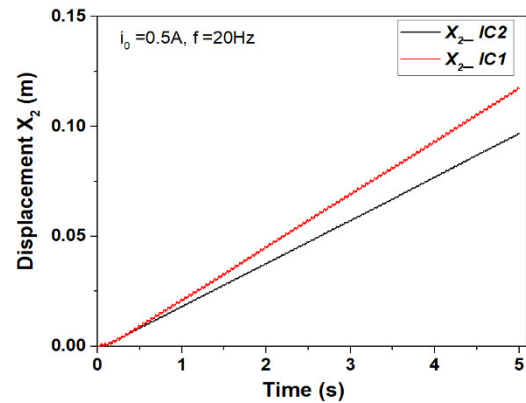
Tương tự như ở các nghiên cứu gần đây, báo cáo này sử dụng thông số về lượng dịch chuyển tuyệt đối của viên nang X_2 hoặc lượng dịch chuyển tương đối sau mỗi chu kỳ kích thích $X_{rel} = X_1 - X_2$ hoặc khả năng điều hướng chuyển động của viên nang, để đánh giá hiệu quả làm việc của viên nang. Các kỹ thuật về phân tích đồ thị pha kèm lát cắt Poincaré, đồ thị thời gian (Time history), đồ thị rẽ nhánh (Bifurcation diagram) sẽ được sử dụng để đánh giá ứng xử động lực học và tính ổn định của cơ hệ viên nang đề xuất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Lượng dịch chuyển đạt được của viên nang, X_2 với chế độ kích thích khác nhau

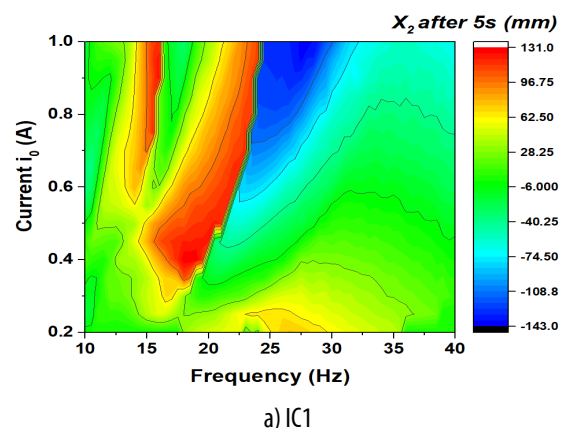
Điều kiện kích thích ban đầu đối với viên nang được lựa chọn khảo sát gồm: $i_0 = 0,5A$, $f = 20Hz$, $G = 2mm$, $D = 50\%$, hai chế độ kích thích IC1 và IC2. Các thông số khác được chọn cố định theo bảng 1. Tại mỗi giá trị tần số khảo sát, công cụ mô phỏng số với phần mềm XPPAuto được sử dụng để quét lượng chuyển vị đạt được sau cùng một khoảng thời gian 5s từ lúc bắt đầu kích thích. Kết quả khảo sát lượng dịch chuyển đạt được trong hai chế độ kích thích IC1 và IC2 được thể hiện như trên hình 3.

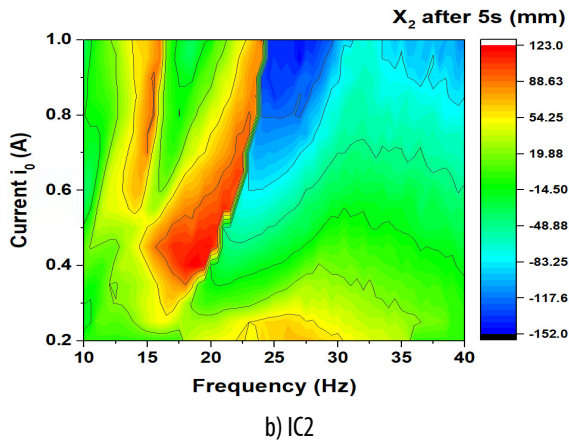
Hình 3a mô tả tiến trình dịch chuyển của robot viên nang theo thời gian ứng với hai điều kiện kích thích IC1 và IC2. Tại tần số khảo sát 20Hz, chế độ kích thích với IC1 cho tốc độ dịch chuyển nhanh hơn so với IC2. Hình 3b cho thấy sự tương quan về lượng dịch chuyển đạt được sau 5s trong dải tần số khảo sát (10 - 40Hz). Kết quả thể hiện rằng ở tất cả các tần số khảo sát, chế độ IC1 đều cho lượng dịch chuyển tiến (forward) và lùi (backward) lớn hơn so với chế độ IC2. Khoảng giá trị tần số mà robot viên nang xảy ra chuyển đổi trạng thái từ tiến sang lùi cả trong hai chế độ IC1 và IC2 khá sát nhau (20 - 21Hz). Tuy nhiên, ở mức kích thích $i_0 = 0,5A$ thì mô hình viên nang gần như chỉ hoạt động tiến với chế độ kích thích IC2. Lượng dịch chuyển lùi lớn nhất là không đáng kể (chỉ 6,1mm/5s tại 21,4Hz). Đây là một hạn chế trong vấn đề điều khiển viên nang bằng cách thay đổi tần số kích thích từ bên ngoài.



Hình 3. (a) Đồ thị chuyển vị theo thời gian (Time history plot), (b) Lượng dịch chuyển đạt được sau 5s khi thay đổi tần số với mức cường độ dòng điện kích thích 0,5A, tại $G = 2mm$

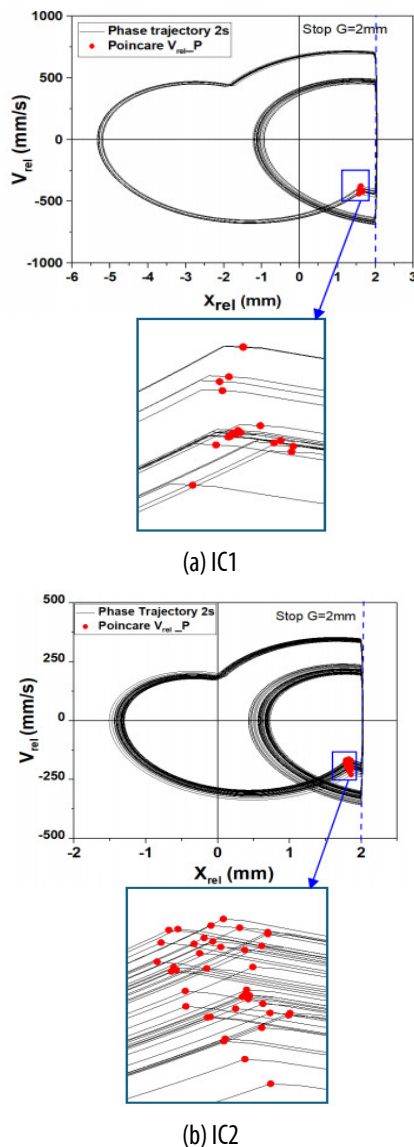
Một khảo sát tổng hợp hơn được thực hiện khi thay đổi đồng thời tần số $f = (10 - 40)Hz$ và cường độ dòng điện kích thích $i_0 = (0,2 - 1,0)A$ để xác định lượng dịch chuyển đạt được sau 5s ứng với hai chế độ kích thích IC1 và IC2, thể hiện như hình 4. Dựa vào bản đồ miền Contour color fill, có thể lựa chọn được giá trị tần số và cường độ dòng điện kích thích ứng với lượng dịch chuyển đạt được mong muốn. Đây sẽ là căn cứ để có thể điều hướng cho viên nang đến đúng vị trí cần quan sát, hướng tới ứng dụng trong nội soi y tế.





Hình 4. Lượng dịch chuyển của viên nang sau 5s ở hai chế độ kích thích IC1(a) và IC2 (b)

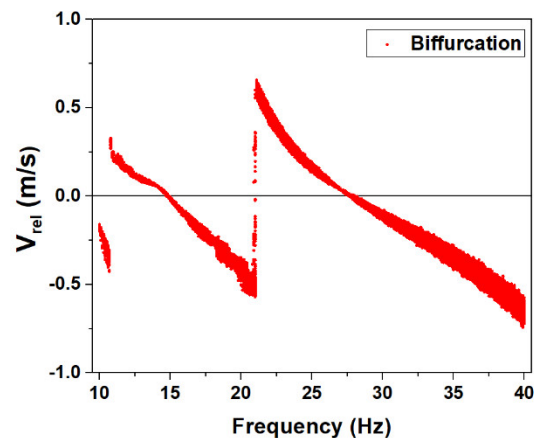
3.2. Đánh giá tính ổn định của chuyển động

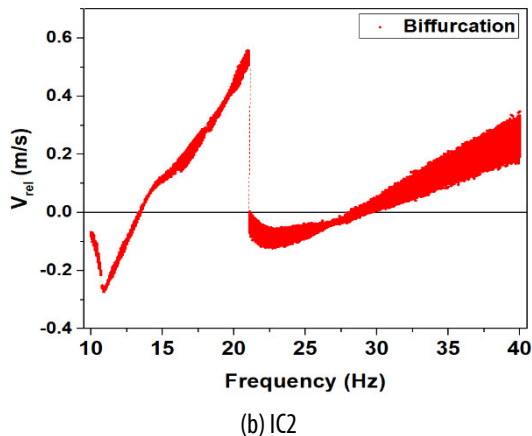


Hình 5. Đồ thị pha của robot viên nang trong thời gian khảo sát 2s ứng với 2 chế độ kích thích IC1 (a) và IC2 (b)

Để đánh giá tính ổn định động lực học cho cơ hệ robot viên nang, kỹ thuật phân tích đồ thị pha, lát cắt Poincaré và đồ thị rẽ nhánh được sử dụng. Đồ thị pha thể hiện quỹ đạo tương quan của giá trị vận tốc chuyển động tương đối V_{rel} so với lượng dịch chuyển tương đối X_{rel} theo thời gian. Hình 5 mô tả quỹ đạo pha (Phase trajectory) ứng với hai chế độ kích thích trong cùng khoảng thời gian khảo sát là 2s. Hình 5a cho thấy với chế độ IC1 các đường quỹ đạo pha xít chồng lên nhau hơn so với chế độ IC2. Điều này cho thấy mức độ biến động trong chuyển động ít hơn so với chế độ IC2. Lát cắt Poincaré tại cùng thời điểm khảo sát biểu diễn trên đồ thị pha cũng thể hiện rõ sự biến động vận tốc tương đối trong các chu kỳ làm việc. Với chế độ IC1 khoảng phân bố giá trị vận tốc tương đối sẽ nhỏ hơn so với IC2. Các lát cắt này cách đều với khoảng thời gian bằng chu kỳ lực kích thích, các giá trị chuyển vị trí tương ứng tại các lát cắt này được minh họa bằng các chấm màu đỏ trên hình 5. Quỹ tích phân bố V_{rel} theo X_{rel} ở lát cắt Poincaré với chế độ IC1 biến động nhỏ hơn đối với kích thích IC2. Trong mỗi chu kỳ kích thích sẽ xảy ra 2 lần va đập giữa khối lượng dịch m_1 với bích va đập (Stop flange), như minh họa trên đồ thị pha hình 5.

Hình 6 trình bày đồ thị phân nhánh, khi khảo sát sự biến động của vận tốc tương đối tại các giá trị tần số kích thích, trong dải (10 - 40)Hz với hai điều kiện IC1 và IC2. Số bước khảo sát đối với tần số là 300 giá trị. Vận tốc tương đối ứng với mỗi tần số kích thích sẽ được ghi nhận trong khoảng thời gian 5 giây (từ giây thứ 5 đến giây thứ 10) ứng với mỗi chu kỳ kích thích, khi giá trị lực kích thích $F_m = 0$ theo hướng xác định. Các chấm đỏ trên đồ thị phản ánh sự biến động của giá trị vận tốc tương đối ở các chu kỳ kích thích khác nhau của viên nang ứng với cùng một tần số kích thích được khảo sát. Khi các chấm đỏ này phân bố càng rộng thì chuyển động của viên nang càng biến động hay kém ổn định.





Hình 6. Đồ thị phân nhánh chuyển động của viên nang ở hai chế độ khảo sát

Tại tần số kích thích 21Hz, ở cả hai chế độ khảo sát đều cho thấy sự biến động đột ngột (bước nhảy) của giá trị vận tốc tương đối V_{rel} . Kết quả này phù hợp với sự biến đổi về hướng chuyển động như mô tả trên hình 3b. Chế độ kích thích IC2, cho thấy ở dải tần số cao 21 - 40Hz, thì sự biến động của vận tốc càng lớn, các chấm phân bố thành dải rộng hơn, chuyển động càng thiếu ổn định.

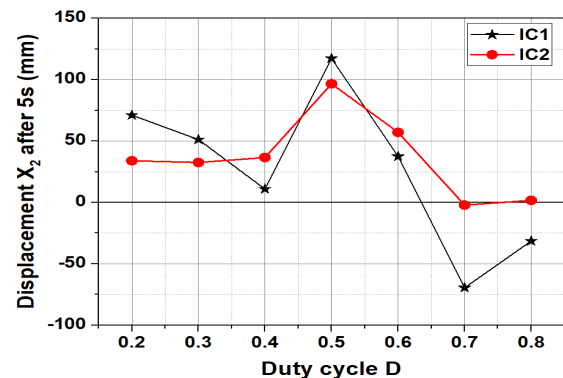
Ngoài ra, cả hai đồ thị (V_{rel} - f) trong điều kiện khảo sát ứng với chế độ kích thích IC1 và IC2 trên hình 6 đều không tìm thấy giá trị tần số mà tại đó bắt đầu xuất hiện sự phân nhánh. Tức là, các đồ thị này không tìm thấy hay không có điểm rẽ nhánh rõ ràng được thể hiện. Tuy nhiên, các giá trị V_{rel} biến động lớn giữa các chu kỳ kích thích khác nhau, tại cùng 1 tần số khảo sát. Chế độ kích thích IC1 có sự biến động ít hơn so với chế độ kích thích IC2. Điều này cũng cho thấy sự chuyển động của cơ hệ viên nang là thiếu sự ổn định với cả hai điều kiện kích thích khảo sát. Kết hợp với kết quả phân tích đồ thị pha và bản đồ Poincaré trên hình 5 càng cho thấy sự chuyển động hỗn loạn, thiếu ổn định của cơ hệ với các điều kiện khảo sát.

3.3. Ảnh hưởng của độ rộng xung tín hiệu D

Để đánh ảnh hưởng của độ rộng xung tín hiệu kích thích (Duty cycle D) đến lượng dịch chuyển đạt được X_2 sau cùng một khoảng thời gian, giá trị của $D = (10 - 80)\%$ hay $(0,2 - 0,8)$ được tiến hành khảo sát với bước 10% (hay 0,1) ứng với mỗi chế độ IC1 và IC2 ở cùng dòng điện kích thích 0,5A, tần số 20Hz.

Hình 7 biểu diễn kết quả phân tích lượng dịch chuyển đạt được sau 5s ứng với mỗi giá trị độ rộng xung D và chế độ IC1 và IC2. Kết quả cho thấy tại mức kích thích 0,5A, 20Hz, khi giá trị $D = 50\% = 0,5$, cả hai chế độ kích thích IC1 và IC2 đều cho lượng dịch chuyển đạt được lớn nhất trong dải D khảo sát. Với kích thích IC2, nếu giữ nguyên giá trị cường độ dòng điện và tần số kích thích 0,5A, tần số 20Hz viên nang gần như chỉ có chuyển theo chiều tiến trong

dải D khảo sát. Điều này chỉ ra rằng viên nang không thể được điều hướng bằng giải pháp thay đổi độ rộng xung D ở điều kiện kích thích này. Với thiết kế viên nang sử dụng pin đặt bên trong, khi giá trị D lớn tức thời gian cấp xung sẽ lớn, tuổi thọ sử dụng pin sẽ thấp. Với giá trị D nhỏ thì thời lượng sử dụng pin sẽ được lâu. Với bài toán điều khiển hoạt động cho viên nang, việc lựa chọn các thông số điều khiển (tần số, biên độ, Duty cycle) phụ thuộc vào các tiêu chí về lượng, tốc độ dịch chuyển, thời gian hoạt động hay mức độ ổn định trong quá trình làm việc. Đây là căn cứ để lựa chọn được bộ thông số vận hành tối ưu đáp ứng các tiêu chí làm việc cho robot dạng viên nang.



Hình 7. Lượng dịch chuyển đạt được sau 5s ứng với các giá trị D (Kích thích 0,5A và 20Hz)

4. KẾT LUẬN

Cơ hệ thiết bị tự di chuyển dạng viên nang khai thác hiệu ứng rung - va đập có đặc tính phi tuyến rất mạnh, nhạy với sự thay đổi của các tham số và nhiễu. Bài báo này cung cấp các kết quả mới đánh giá về tác động của lực kích thích dao động F_m đến trạng thái chuyển động và tính ổn định của capsobot. Dạng xung tín hiệu, cường độ lực, tần số và giá trị độ rộng xung D đều có ảnh hưởng mạnh tới ứng xử động lực học của robot viên nang. Bằng công cụ mô phỏng số với phần mềm XPPAuto, các thông số ảnh hưởng này được khảo sát và đánh giá. Kết quả phân tích số với các điều kiện ban đầu chọn trước, cho thấy khả năng điều khiển được hoạt động về hướng và lượng dịch chuyển mong muốn cho robot. Trong đó, điều kiện kích thích IC1 (tức sóng Rectangular wave - đảo dấu điện áp cấp) cho lượng dịch chuyển đạt được, khả năng điều hướng chuyển động nhờ thay đổi tần số kích thích và mức độ ổn định tốt hơn so với trạng thái kích thích IC2 (sóng xung đóng ngắt, pulse). Tuy nhiên, việc tạo dạng kích thích xung vuông (kiểu Pulse - IC2) được cho là thuận lợi và dễ dàng hơn về thiết bị cũng như khả năng điều khiển cho ứng dụng robot viên nang đề xuất. Với nguồn nuôi cho cơ hệ viên nang là pin Lithium có dung lượng và dòng xả xác định thì thiết bị đóng, ngắt bám tín hiệu

nguồn thành dạng xung với D mong muốn là rất khả thi. Nghiên cứu cũng đề xuất mô hình điều khiển không dây sử dụng Bluetooth, giúp hệ thống có khả năng điều khiển từ xa. Đây cũng là cách thức được lựa chọn để phát triển cho mô hình viên nang sử dụng pin kèm theo mạch khuếch đại hoặc mạch đóng ngắt không dây (Bluetooth) để loại bỏ dây dẫn. Cách tiếp cận này kết hợp giữa lý thuyết động lực học và mô phỏng thực tế, tạo tiền đề cho các nghiên cứu thực nghiệm trong tương lai.

Các bản đồ miền 2D (Contour color fill) cho phép lựa chọn được giá trị tần số và cường độ dòng điện kích thích ứng với lượng dịch chuyển đạt được mong muốn, theo hướng tiến hoặc lùi. Đây sẽ là căn cứ để có thể điều hướng cho viên nang đến đúng vị trí cần quan sát, hướng tới ứng dụng trong nội soi y tế. Với ứng dụng hướng đến là robot dạng viên nang được đóng kín, không có dây dẫn vật lý để hạn chế chuyển động thì giải pháp điều khiển tần số và biên độ lực kích thích từ bên ngoài là hết sức cấp thiết.

Tóm lại, dù các kết quả mô phỏng số với điều kiện ma sát khô chưa sát với điều kiện làm việc thực, mô hình chưa được kiểm chứng bằng thực nghiệm nhưng đây là những phát hiện quan trọng giúp tối ưu hóa thiết kế và khả năng điều khiển capsobot, hướng đến phát triển hoàn thiện mô hình robot dạng viên nang nội soi trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên (TNUT) trong đề tài cấp Trường, mã số T2024-NCS01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Koprowski R., "Overview of technical solutions and assessment of clinical usefulness of capsule endoscopy," *Biomed Eng Online*, 14: 111, 2015.
- [2]. Alexander P. B., J. Ahalapitiya H., "Analysis of current and future technologies of capsule endoscopy: A mini review," *Archives of Preventive Medicine*, 5(1): 031-034, 2020.
- [3]. Levy J.A., et al., "Magnetically triggered ingestible capsule for localized microneedle drug delivery," *Device*, 100438, 2024.
- [4]. Yang Z., et al., "Magnetically Actuated Continuum Medical Robots: A Review," *Advanced Intelligent Systems*, 5(6), 2023.
- [5]. Chen W., J. Sui, C. Wang, "Magnetically Actuated Capsule Robots: A Review," *IEEE Access*, 10: 88398-88420, 2022.
- [6]. Son D., H. Gilbert, M. Sitti, "Magnetically Actuated Soft Capsule Endoscope for Fine-Needle Biopsy," *Soft Robot*, 7(1): 10-21, 2020.
- [7]. Yan Y., et al., "A new capsule-intestine model for the capsule robot self-propelling in the lower gastrointestinal tract," *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 105: 105233, 2024.
- [8]. Zhang J., et al., "Design and Experimental Investigation of a Vibro-Impact Capsule Robot for Colonoscopy," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(3): 1842-1849, 2023.

- [9]. Yin S., et al., "Dynamics of a self-propelled capsule robot in contact with different folds in the small intestine," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 126: 107445, 2023.
- [10]. Duong T.H., et al., "Dynamic response of vibro-impact capsule moving on the inclined track and stochastic slope," *Meccanica*, 2022.
- [11]. Xu J., H. Fang, "Improving performance: recent progress on vibration-driven locomotion systems," *Nonlinear Dynamics*, 98(4): 2651-2669, 2019.
- [12]. Nunuparov A., et al., "Dynamics and motion control of a capsule robot with an opposing spring," *Archive of Applied Mechanics*, 89(10): 2193-2208, 2019.
- [13]. Nguyen V.D., H.C. Nguyen, T.H. Duong, *Modeling and dynamic analysis of self-propelled equipment by vibration*. Thai Nguyen University Publishing House Thai Nguyen, 2017.
- [14]. Chernous'ko F.L., "The optimum rectilinear motion of a two-mass system," *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 66(1): 1-7, 2002.
- [15]. Nguyen V.D., et al., "The effect of inertial mass and excitation frequency on a Duffing vibro-impact drifting system," *International Journal of Mechanical Sciences*, 124-125: 9-21, 2017.
- [16]. Saponov K.A., A.A. Cherepanov, S.F. Yatsun, "Investigation of motion of a mobile two-mass vibration-driven system," *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 49(1): 144-151, 2010.
- [17]. Liu P., et al., "A self-propelled robotic system with a visco-elastic joint: dynamics and motion analysis," *Engineering with Computers*, 36(2): 655-669, 2019.
- [18]. Liu P., H. Yu, S. Cang, "Optimized adaptive tracking control for an underactuated vibro-driven capsule system," *Nonlinear Dynamics*, 94(3): 1803-1817, 2018.
- [19]. Carta R., et al., "A multi-coil inductive powering system for an endoscopic capsule with vibratory actuation," *Sensors and Actuators A: Physical*, 172(1): 253-258, 2011.
- [20]. La N.T., et al., "An Experimental Study on Vibration-Driven Locomotion Systems Under Different Levels of Isotropic Friction," In Sattler K.U., Nguyen D.C., Vu N.P., Long B.T., Puta H. (eds) *Advances in Engineering Research and Application, Lecture Notes in Networks and Systems*, ICERA 2020, 178: 181-191, 2021.
- [21]. Liu Y., E. Pavlovskaya, M. Wiercigroch, "Experimental verification of the vibro-impact capsule model," *Nonlinear Dynamics*, 83(1-2): 1029-1041, 2015.
- [22]. Huda M.N., H. Yu, "Trajectory tracking control of an underactuated capsobot," *Autonomous Robots*, 39(2): 183-198, 2015.
- [23]. Huda M.N., H.N. Yu, S.O. Wane, "Self-contained capsobot propulsion mechanism," *International Journal of Automation and Computing*, 8(3): 348-356, 2011.

AUTHORS INFORMATION

Ngô Quốc Huy¹, Nguyễn Văn Du¹, Hoàng Tiến Đạt²

¹Thai Nguyen University of Technology, Vietnam

²School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam