

THIẾT KẾ VÀ TÍNH TOÁN TỐI ƯU HỆ THỐNG PHẢN HỒI LỰC 3 CHIỀU DÙNG PHANH CHẤT LƯU TỪ BIẾN

DIỆP BẢO TRÍ*, VŨ VĂN BỘ, NGUYỄN QUỐC HÙNG

Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: diepbaotri@iuh.edu.vn

DOIs: <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v67i01.5023>

Tóm tắt. Mục tiêu của nguyên cứu này là thiết kế và đánh giá khả năng phản hồi của cần điều khiển 3D phản hồi lực sử dụng ba phanh MRF (Magnetorheological fluid) thông qua cơ cấu khung xoay. Sau khi tổng hợp các nguyên cứu có liên quan về hệ thống phản hồi lực sử dụng lưu chất MRF, một cấu hình của cần điều khiển 3D phản hồi lực là được đề xuất trong nghiên cứu này. Cấu hình của cần điều khiển 3D phản hồi lực bao gồm ba phanh MRF được kết hợp vuông góc với nhau thông qua cơ chế khung xoay 3 chiều để tạo ra lực phản hồi cho từng chuyển động theo các phương X, Y, Z . Sau đó, tác giả đi thiết kế mô hình phanh MRF cho hệ phản hồi lực 3D đã được đề xuất dựa trên mô hình dẻo Bingham và phương pháp phân tử hữu hạn. Để giảm khối lượng cũng như là chi phí chế tạo cho các phanh MRF, bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu cho phanh MRF được thực hiện bằng phương pháp PSO (Particle Swarm Optimization). Trên cơ sở các kết quả tối ưu như thông số hình học tối ưu của MRB để thiết kế mô hình cần điều khiển 3D phản hồi lực và chế tạo rồi sau đó tiến hành thực nghiệm để kiểm tra lực phản hồi. Từ đó, nghiên cứu này sẽ mở ra cho việc nghiên cứu phản hồi lực trong lĩnh vực điều khiển từ xa cụ thể có thể áp dụng cho hệ thống Master – Slave sau này.

Từ khóa. Phản hồi lực, cần điều khiển 3D phản hồi lực, PSO, phanh MRF.

1 GIỚI THIỆU

Trong nền công nghiệp hóa và hiện đại hóa, việc ứng dụng điều khiển từ xa đóng vai trò quan trọng trong cuộc sống hiện nay như các robot làm việc trong môi trường độc hại (ô nhiễm, phóng xạ,...) hoặc các môi trường khắc nghiệt (ngoài không gian và dưới biển). Một hệ thống điều khiển từ xa cơ bản bao gồm hai cơ cấu chính là cơ cấu chủ động (Mater) và cơ cấu bị động (Slaver). Tuy nhiên, hệ thống điều khiển từ xa còn sót một số thông tin quan trọng trong quá trình vận hành đó chính là lực và mô men phản hồi (lực tác động ở khâu cuối của cơ cấu bị động) để cho người điều khiển có thể điều khiển được lực tác động mong muốn cũng như là làm giảm đi độ chính xác và tính linh hoạt của hệ thống. Bên cạnh đó, trong những năm gần đây đã có rất nhiều nghiên cứu, phát triển và ứng dụng các vật liệu thông minh, đặc biệt là lưu chất từ biến (MRF – Magnetorheological fluid). Khi mà dưới tác dụng của từ trường, MRF thay đổi cơ tính rất nhanh từ trạng thái lỏng thành trạng thái rắn và ngược lại. Do đó, với đặc tính đặc biệt này, MRF trở thành một vật liệu tiềm năng cho những ứng dụng như ly hợp, phanh, bộ giảm chấn,... [1-3]. Bên cạnh đó, trong những năm gần đây đã có một số nghiên cứu thực hiện và phát triển về hệ thống phản hồi lực sử dụng cơ cấu chấp hành bằng lưu chất MRF. Kim và các cộng sự đã thiết kế và chế tạo bàn tay xúc giác (haptic hand) 5 DOF sử dụng các phanh tuyến tính MRF để cảm nhận được lực phản hồi từ các đầu ngón tay [4]. Kết quả cho thấy rằng bàn tay xúc giác này có thể phản ánh các lực cần thiết lên các ngón tay của người vận hành (8N). Tuy nhiên, lực ban đầu (lực tại thời điểm dòng điện bằng 0) của các phanh MRF còn khá cao, khoảng 2N. Đó cũng chính là thách thức lớn đối với hệ thống phản hồi lực để phản ánh lực thực tế cho người vận hành có thể cảm nhận. Winter và Bouzit đã nghiên cứu và chế tạo thành công một găng tay xúc giác 5 DOF (haptic glove) bằng cách sử dụng 5 phanh MRF tuyến tính [5]. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng lực tối đa của các phanh MRF tuyến tính lên đến 6N. Tuy nhiên, hạn chế của hệ thống này là lực ban đầu còn khá cao, khoảng 1.5N và kích thước của các phanh MRF tuyến tính này còn khá lớn 50x12x12mm. C. Bullion và H. Gurocak đã thực hiện nghiên cứu về một găng tay xúc giác 3DOF sử dụng 3 phanh MRF xoay để tạo ra lực phản hồi từ các ngón tay [6]. Kích thước chung của phanh là $D = 25\text{mm}$ và $L = 15\text{mm}$ và lực tối đa ở các đầu ngón tay có thể đạt tới 17N. Li và các cộng sự đã nghiên cứu về cần điều khiển 2DOF phản hồi lực sử dụng 2 phanh MRF quay [7]. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng mô men sinh ra của phanh

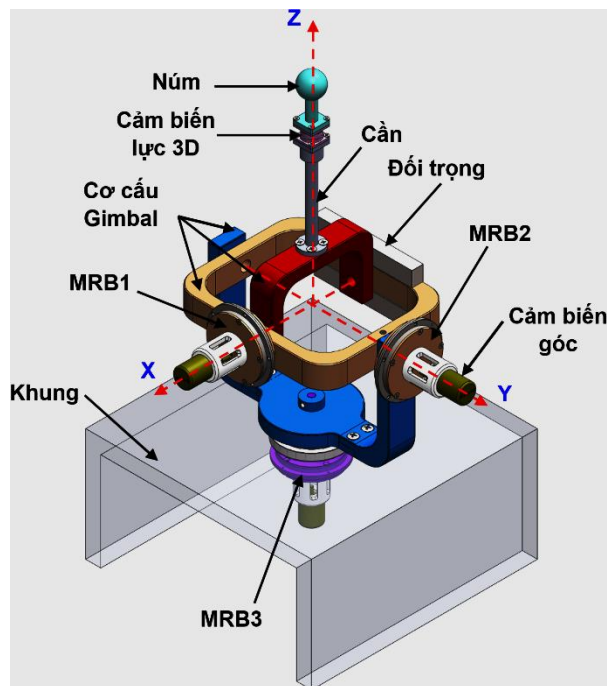
dao động từ 0.5 đến 6Nm. Tuy nhiên, kích thước tổng thể của hệ thống phanh MRF sử dụng trong nghiên cứu này là còn khá lớn, $D = 156\text{mm}$ và $L = 19\text{mm}$ và mô men sinh ra của phanh dao động từ 0.5 đến 6Nm. Thêm vào đó, Nguyễn Quốc Hưng và các cộng sự đã thực hiện một số nghiên cứu về hệ thống phản hồi lực sử dụng cơ cấu chấp hành bằng MRF [8-10].

Để lấp đầy những thiếu sót trên của các nghiên cứu trước và ứng dụng tiềm năng của MRF vào trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào việc giới thiệu và phát triển một cần điều khiển 3D phản hồi lực sử dụng ba phanh MRF mới, hệ thống này đóng vai trò như là một cơ cấu chủ động (Master) như đã đề cập. Về bố cục bài báo, sau khi tổng hợp và phân tích các nghiên cứu có liên quan, cấu hình mới của cần điều khiển 3D phản hồi lực sử dụng 3 phanh MRF xoay và đồng thời cấu hình của phanh MRF sẽ được trình bày trong phần 2. Sau đó, mô hình toán của phanh MRF dựa trên mô hình dẻo Bingham và phương pháp phần tử hữu hạn sẽ được trình bày. Đồng thời, động học của cần điều khiển 3D cũng sẽ được trình bày trong phần 3. Cuối cùng, bài toán tối hóa của phanh MRF sẽ được thực hiện bằng phương pháp PSO nhằm để giảm kết cấu cho phanh MRF đã được đề xuất này.

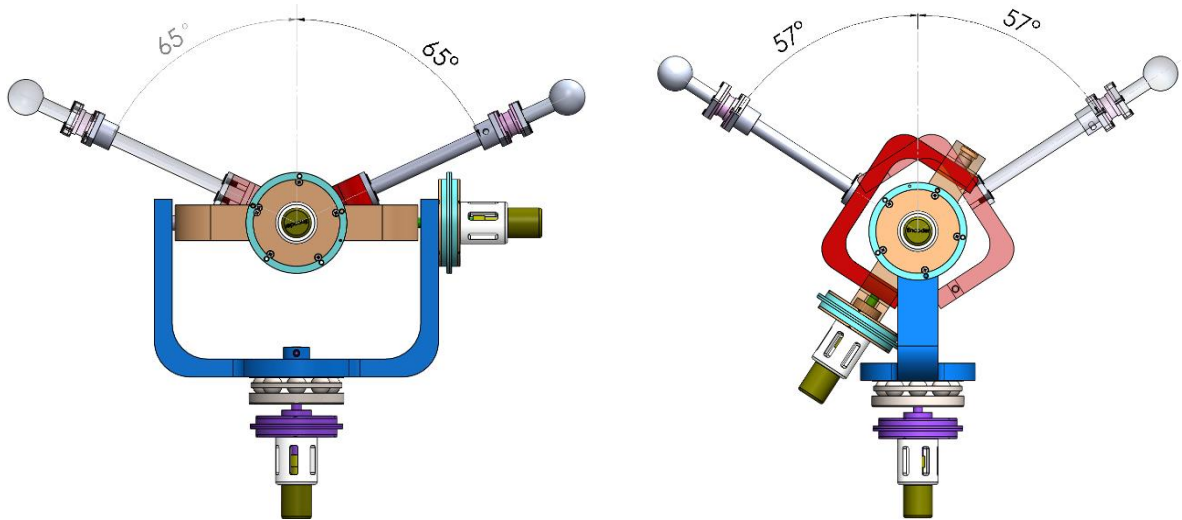
2 CẤU HÌNH VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

2.1 Cấu hình và nguyên lý hoạt động của cần điều khiển 3D

Trong phần này, cấu hình của cần điều khiển 3D phản hồi lực là được đề xuất và được thể hiện ở Hình 1. Có thể thấy rằng cần điều khiển 3D phản hồi lực này sử dụng ba phanh MRF (MRB1, MRB2, MRB3) nhằm để tạo ra lực phản hồi cho từng chuyển động xoay của mỗi trục mong muốn (X, Y, Z). Từ hình 1, có thể thấy rằng MRB1 và MRB2 sẽ được kết nối với cơ cấu khung xoay ở bên trong và MRB3 sẽ được gắn ở giữa bộ phận khung xoay (gimbal mechanism) và khung (frame) của cần điều khiển. Để mà có thể xác định được vị trí của núm điều khiển thì các cảm đo biến góc (encoder) được sử dụng tại từng trục và chúng được lắp đặt như trong Hình 1. Sau đó, có thể xác định được cánh tay đòn của hệ thống thông qua việc xác định vị trí của núm điều khiển. Do đó, có thể xác định lực phản hồi tại núm điều khiển theo ba phương X, Y, Z bao gồm là F_1, F_2, F_3 có thể thu được thông qua mô men ma sát sinh ra bởi ba phanh MRF tương ứng. Để kiểm tra các lực phản hồi đó thì cảm biến lực 3D là được sử dụng và được gắn ở giữa núm điều khiển của cần điều khiển và MRB3. Hình 2 thể hiện phạm vi làm việc của cần điều khiển 3D. Lưu ý rằng phạm vi hoạt động của cần điều khiển quay quanh trục X là $\pm 65^\circ$ và Y là $\pm 57^\circ$ và trong khi đó, trục Z xoay 360° .



Hình 1: Cấu hình của cần điều khiển 3D phản hồi lực.

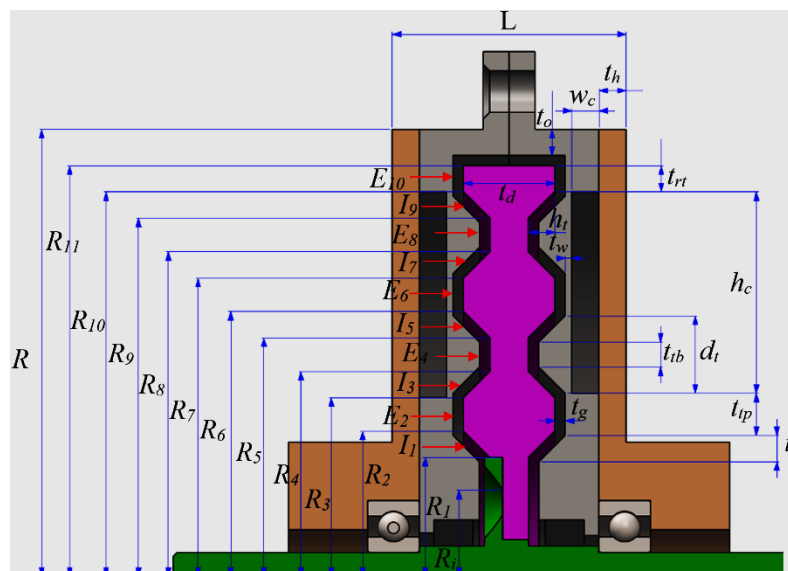


a) Phạm vi hoạt động của cần điều khiển quanh trục X b) Phạm vi hoạt động của cần điều khiển quanh trục Y

Hình 2: Phạm vi hoạt động của cần điều khiển quanh trục X và Y.

2.2 Cấu hình và nguyên lý làm việc phanh MRF

Trong nghiên cứu này, phanh MRF có rotor dạng răng được ứng dụng cho hệ thống cần điều khiển 3D phân hồi lực đã được đề xuất ở trên. Hình 3 biểu diễn cấu hình và các thông số hình học của phanh MRF có rotor dạng hình răng. Về mặt cấu tạo của phanh MRF, đĩa phanh được làm từ vật liệu từ tính và được gắn ở trên trục quay được làm từ vật liệu không từ tính, chúng được đặt ở bên trong vỏ phanh. Khe ở giữa đĩa phanh và vỏ phanh sẽ được lấp đầy bằng lưu chất MRF. Để tạo ra từ trường tác dụng lên lưu chất MRF và làm thay đổi cơ tính của MRF trong quá trình vận hành của phanh hai cuộn dây được đặt ở mỗi bên vỏ phanh. Lưu ý rằng hai dòng điện ngược chiều được cấp vào mỗi cuộn dây như trong Hình 3.



Hình 3: Cấu hình và thông số hình học của phanh MRF.

2.3 Phân tích mạch từ của phanh MRF

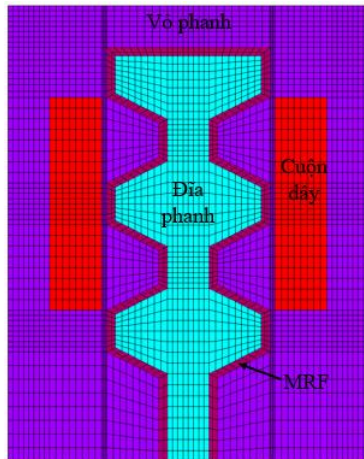
Phân tích mạch từ của phanh MRF có rotor dạng răng được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được tích hợp trong phần mềm ANSYS. Mô hình phần tử hữu hạn sử dụng phần tử đối xứng trục (PLANE 13) trong phần mềm ANSYS APDL để thiết lập mạch từ cho phanh MRF đã được đề xuất và mạch từ của phanh MRF được thể hiện ở Hình 4a. Lưu ý rằng độ từ thẩm 1.0 (tương ứng với độ từ thẩm

của không khí) được sử dụng cho các bộ phận MRB như trục (inox) và cuộn dây (làm bằng đồng) trong khi đặc tính từ của các bộ phận từ tính (như vỏ và đĩa) được sử dụng dựa vào đường cong $B-H$ của vật liệu thép C45. Bên cạnh đó, đường cong $B-H$ đại diện cho đặc tính từ của MRF được thể hiện ở công thức sau [11]:

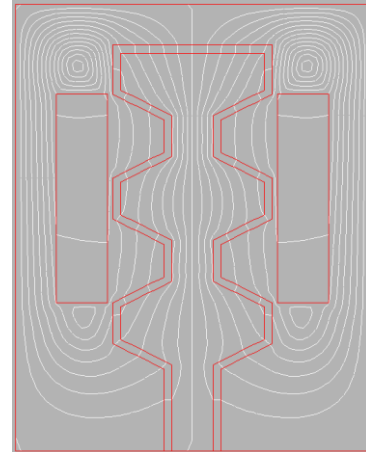
$$B = 1.91\Phi^{1.133} [1 - \exp(-10.97\mu_0 H) + \mu_0 H] \quad (1)$$

Trong đó, B (Tesla) là mật độ từ trường và H (A/m) là cường độ từ trường; độ từ thẩm của chân không là $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$; Φ là phần trăm thể tích của MRF.

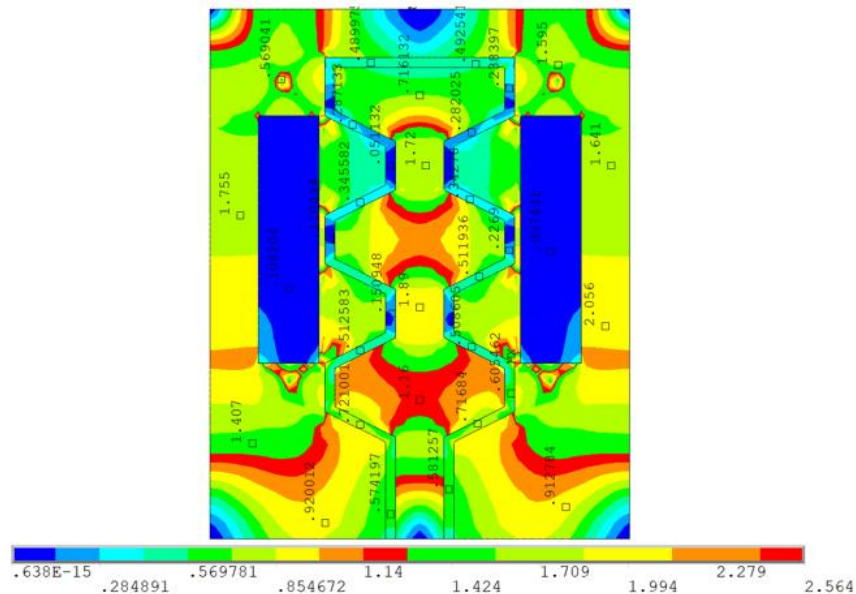
Hình 4b và 4c cho thấy các đường sức từ và mật độ từ trường trong mạch từ phanh MRF ở các giá trị biến thiết kế ban đầu ngẫu nhiên được mô phỏng bằng phần mềm ANSYS APDL.



a) Mạch từ của phanh MRF



b) Phân bố đường sức từ trong mạch từ phanh MRF



c) Mật độ từ trường của phanh MRF

Hình 4: Phân tích mạch từ của phanh MRF.

3 MÔ HÌNH TOÁN CỦA PHANH MRF VÀ ĐỘNG HỌC CỦA CÀN ĐIỀU KHIỂN 3D

3.1 Mô hình toán của phanh MRF

Giả sử rằng, MRF hoạt động lưu biến dựa trên mô hình dẻo Bingham và vận tốc trong khe hở MRF của phanh MRF là phân bố tuyến tính. Dựa trên mô hình dẻo Bingham của MRF, đặc tính lưu biến của MRF được xác định bằng công thức sau [12,13]:

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{r\Omega}{d} \quad (2)$$

Trong đó, τ là ứng suất trượt giữa các lớp liền kề của MRF; τ_y và μ lần lượt là ứng suất trượt và độ nhớt của MRF; r và d là bán kính của các phần tử vòng và kích thước của khe hở MRF; Ω là tốc độ của trục quay.

Do đó, công thức mô men đầu ra của phanh MRF từ Hình 3 là được xác định bằng công thức sau:

$$T_b = 2 \left(\sum_{i=0,2,4,6,8,10} T_{Li} + \sum_{j=1,3,5,7,9} T_{Ij} + T_s \right) + T_c \quad (3)$$

Trong đó, T_{Li} là mô men ma sát gây ra trên đoạn khe hở thẳng L_i ; T_{Ij} là mô men ma sát gây ra trên đoạn khe hở nghiêng I_j ; T_c là mô men ma sát gây ra trên đoạn mặt trụ ngoài giữa đĩa và mặt trong vỏ phanh. T_s là mô men ma sát của lip-seal. Bên cạnh đó, giả sử rằng mô men ma sát của ổ lăn là không đáng kể trong cơ cấu phanh MRF được đề xuất.

Các mô men ma sát thành phanh của phanh MRF (T_{Li} , T_{Ij} , T_c , T_s) là được xác định bằng các công thức sau: [10,12,13]

$$T_{Li} = \frac{\pi\mu_{Li}R_{i+1}^4}{2d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{2\pi\tau_{yLi}}{3} (R_{i+1}^3 - R_i^3); i = 0, 2, 4, 6, 8, 10 \quad (4)$$

$$T_{Ij} = 2\pi \left(R_j^2 l + R_j l^2 \sin \varphi + \frac{1}{3} l^3 \sin^2 \varphi \right) \tau_{yIj} + \frac{1}{2} \pi \mu_{Ij} \frac{l\Omega}{d} \left(4R_j^3 + 6R_j^2 l \sin \varphi + 4R_j l^2 \sin^2 \varphi + l^3 \sin^3 \varphi \right); \quad (5)$$

$j = 1, 3, 5, 7, 9$

$$T_c = 2\pi R_{11}^2 b \tau_{yc} + \mu_c \frac{\Omega R_{11}}{d} \quad (6)$$

$$T_s = 0.65(2R_s)^2 \Omega^{1/3} \quad (7)$$

Trong đó, R_i và R_j lần lượt là bán kính trong của các phần tử i^{th} và j^{th} biên dạng của đĩa phanh được thể hiện ở Hình 3; l và φ lần lượt là chiều dài và góc nghiêng trong khe hở MRF của phanh MRF; R_s là bán kính trong của lip-seal; τ_{yLi} , τ_{yIj} , τ_{yc} lần lượt là ứng suất trượt của MRF trong khe hở MRF đoạn thẳng, đoạn nghiêng và mặt trụ ngoài; μ_{Li} , μ_{Ij} , μ_c lần lượt là độ nhớt của MRF trong khe hở MRF đoạn thẳng, đoạn nghiêng và mặt trụ ngoài.

Trong nghiên cứu này, ứng suất trượt (τ_y) và độ nhớt của MRF thông số lưu biến quan trọng của MRF, chúng phụ thuộc vào mật độ từ trường tác dụng lên MRF và được xác định bằng công thức sau [9]:

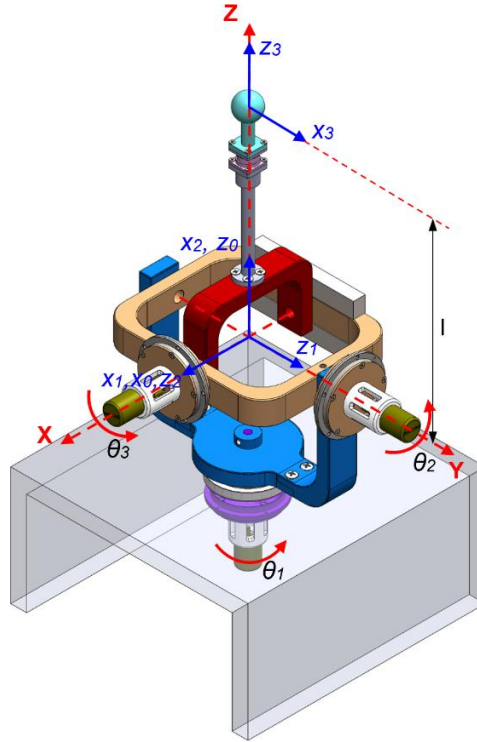
$$\tau_y = \tau_{y\infty} + (\tau_{y0} - \tau_{y\infty}) \left(2e^{-B\alpha_{\tau_y}} - e^{-2B\alpha_{\tau_y}} \right) \quad (8)$$

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left(2e^{-B\alpha_{\mu}} - e^{-2B\alpha_{\mu}} \right) \quad (9)$$

Trong đó, ứng suất trượt và độ nhớt của MRF tại thời điểm chưa có từ trường tác dụng lần lượt là τ_{y0} , μ_0 ; ứng suất trượt và độ nhớt của MRF tại thời điểm bão hòa từ là $\tau_{y\infty}$, μ_{∞} ; B là mật độ từ trường tác dụng lên MRF (T); α_{τ_y} , α_{μ} lần lượt là chỉ số bão hòa tương ứng với ứng suất trượt và độ nhớt của MRF. Thêm vào đó, MRF được sử dụng do hãng LORD sản xuất và có các thông số từ biến như sau [9]: $\mu_0 = 0.1 \text{ pa} \cdot \text{s}$; $\mu_{\infty} = 3.8 \text{ pa} \cdot \text{s}$; $\alpha_{\tau_y} = 2.9 \text{ T}^{-1}$; $\alpha_{\mu} = 4.5 \text{ T}^{-1}$; $\tau_{y0} = 15 \text{ pa}$; $\tau_{y\infty} = 40000 \text{ pa}$.

3.2 Động học của cần điều khiển 3D

Hình 5 thể hiện các hệ tọa độ làm việc của cần điều khiển 3D. Giả định rằng chiều dài từ nùm điều khiển đến góc tọa độ (góc giao giữa các trục của MRB1, MRB2 và MRB3) là l . Và $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ lần lượt là góc quay của cần điều khiển theo 3 trục X, Y, Z . Từ các giả thuyết trên, bảng $D-H$ (Debavit-Hartenberg) của cần điều khiển 3D là được trình bày ở Bảng 1.



Hình 4: Các hệ tọa độ của cần điều khiển 3D.

Bảng 1: Bảng *D-H* của cần điều khiển 3D

Frame(i)	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	$-\pi/2$	0	θ_1
2	0	$-\pi/2$	0	θ_2
3	0	$-\pi/2$	0	θ_3

Từ bảng *D-H*, ma trận biến hình của cần điều khiển 3D là được trình bày dưới dạng công thức sau [14]:

$${}^0_3T = {}^0_1T \times {}^1_2T \times {}^2_3T \quad (10)$$

Trong đó; ${}^i_{i+1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & c\theta_i s\alpha_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; $s = \sin()$; $c = \cos()$ (11)

Vị trí của nùm điều khiển trong không gian được xác định bằng phương pháp động học thuận như sau:

$$r_p = {}^0_3T \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lc\theta_3 s\theta_1 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 \\ -lc\theta_1 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 \\ ls\theta_2 s\theta_3 \\ 1 \end{bmatrix}; s = \sin(); c = \cos() \quad (12)$$

Dựa vào công thức (13) có thể xác định mối quan hệ giữa mô men và lực của cần điều khiển 3D phản hồi lực được đề xuất này:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = J^T(\theta) \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

Trong đó, $J(\theta)$ là ma trận Jacobian của cần điều khiển 3D theo góc θ ; T_x, T_y, T_z lần lượt là mô men của cần điều khiển 3D theo các phương tương ứng X, Y, Z ; F_x, F_y, F_z lần lượt là lực của cần điều khiển 3D theo các phương X, Y, Z .

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_{p11}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_{p11}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_{p11}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial r_{p21}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_{p21}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_{p21}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial r_{p31}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_{p31}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_{p31}}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad ; s = \sin(); c = \cos() \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} l \cdot (c\theta_1 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3) & l \cdot (c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3) & -l \cdot (s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) \\ l \cdot (c\theta_3 s\theta_1 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3) & l \cdot (s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3) & l \cdot (c\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1) \\ 0 & l \cdot (c\theta_2 s\theta_3) & l \cdot c\theta_3 s\theta_2 \end{bmatrix}$$

4 TỐI ƯU HÓA VÀ KẾT QUẢ TỐI ƯU HÓA

4.1 Bài toán tối ưu hóa đặt ra

Trong phần này, bài toán tối ưu hóa của phanh MRF sẽ được trình bày dựa vào hai mục tiêu sau: khối lượng và mô men sinh ra của phanh MRF. Cần lưu ý rằng, trong thiết kế cơ cấu phanh MRF thì khối lượng và mô men phanh là hai mục tiêu quan trọng trong quá trình tối ưu hóa nhưng lại đối nghịch với nhau. Để thỏa mãn hai mục tiêu trên, khối lượng phanh (m_b) sẽ được xem như là làm mục tiêu chính của bài toán tối ưu hóa phanh MRF này và đồng thời mô men phanh (T_b) sẽ bị ràng buộc phải lớn hơn hoặc bằng so với mô men mong muốn (T_{br}) để đạt được lực phản hồi mong muốn.

$$\text{Hàm mục tiêu: } OBJ = m_b = V_d \rho_d + V_h \rho_h + V_{MR} \rho_{MR} + V_c \rho_c + V_s \rho_s$$

$$\text{Ràng buộc: } T_b \geq T_{br}$$

Trong đó, V_d, V_h, V_{MR}, V_c và V_s lần lượt là thể tích của đĩa phanh, vỏ phanh, MRF, cuộn dây và trục phanh; $\rho_d, \rho_h, \rho_{MR}$ và ρ_c lần lượt là các khối lượng riêng của vật liệu tương ứng đã nêu trên; T_{br} là mô men phanh đầu ra yêu cầu tối đa và được xác định từ lực phản hồi mong muốn tối đa như sau:

$$T_{br} = l_{\max} F_{\max} \quad (10)$$

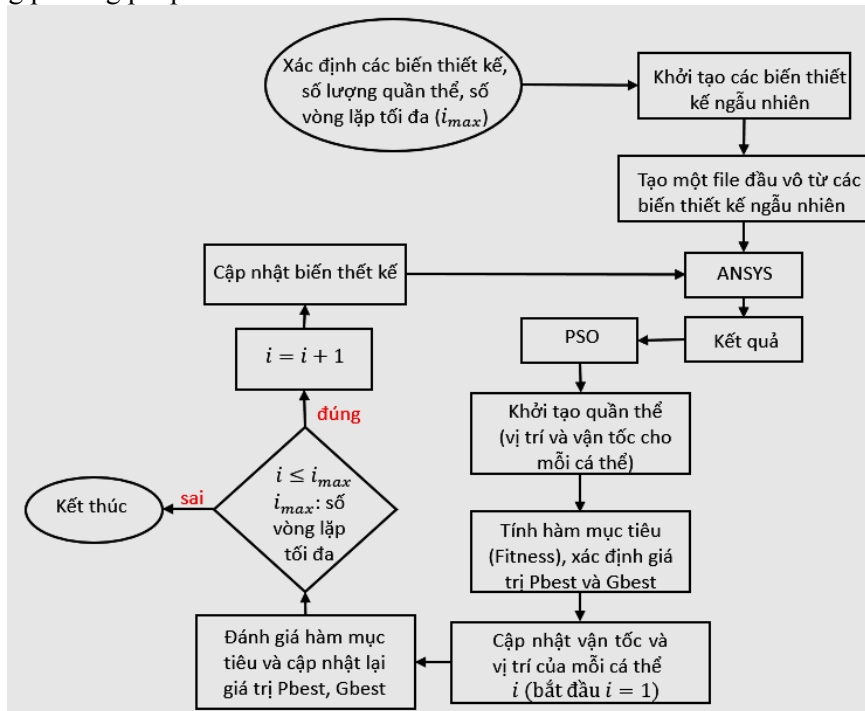
Từ công thức (10), lực phản hồi mong muốn tối đa (F_{\max}) đạt được chọn là 20N và chiều dài tối đa của cần điều khiển (l_{\max}) là 200mm được sử dụng trong nghiên cứu này. Từ các thông số trên áp dụng công thức ở phương trình (10) sẽ cho ra mô men phanh mong muốn tối đa là 4Nm, nhưng chúng tôi cân nhắc đến sự thất thoát từ trường và độ chính xác trong quá trình gia công, cho nên mô men phanh đầu ra mong muốn được chọn là 5Nm trong nghiên cứu này.

Bên cạnh đó, các biến thiết kế của phanh MRF (DVs) được đề xuất bao gồm: bề dày đĩa (t_d), chiều dài và rộng của cuộn dây (w_c, h_c), bán kính trong của đĩa (R_i), bán kính trong của răng (R_f), bề dày rãnh nghiêng (t_i), bề dày đỉnh răng (t_{ip}), bề dày của răng dưới (t_{ib}), khoảng cách giữa các răng (d_f), chiều cao của răng (h_f), bề dày của răng hình chữ nhật (t_{rn}), bề dày của thành mỏng giữa khe hở MRF và cuộn dây (t_w), bề dày của vỏ phanh (t_o và t_h).

4.2 Phương pháp giải bài toán tối ưu hóa

Để giải quyết bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu có ràng buộc trên, có rất nhiều phương pháp tối ưu hóa hiện nay chẳng hạn như phương pháp Newton-Raphson, phương pháp Penalty, phương pháp nội suy bậc 2, phương pháp Quasi-Newton, phương pháp Powell, phương pháp gradient liên hợp (Fletcher-Reeves), phương pháp bầy đàn (PSO),... Trong những phương pháp đã nêu trên phương pháp bầy đàn sẽ giúp tìm ra được giá trị tối ưu toàn cục mà chỉ với các điều kiện khởi tạo đơn giản. Do đó, phương pháp PSO sẽ giúp giảm được chi phí tính toán và thời gian tính toán trong suốt quá trình giải bài toán tối ưu hóa. Phương pháp PSO hoạt động dựa trên các hành vi và tập tính bầy đàn của loài chim mà khám phá ra một không gian tìm kiếm mới để đạt được hội tụ (Pbest – Position best, Gbest – Global best) [15]. Phương pháp PSO này được thực hiện trên MATLAB và kết nối với phần mềm ANSYS APDL để tìm ra kết quả tối ưu cho bài toán tối

ưu hóa đã nêu trên trong nghiên cứu này. Hình 6 cho thấy sơ đồ giải thuật để giải bài toán tối ưu hóa cho phanh MRF bằng phương pháp PSO.



Hình 6: Sơ đồ giải thuật để giải bài toán tối ưu hóa của phanh MRF bằng cách sử dụng phương pháp PSO.

Để giải bài toán tối ưu hóa trên bằng phương pháp PSO cần phải xác định các thông số quan trọng sau: các biến thiết kế đầu vào và số vòng lặp tối đa (iteration: $i_{max}=100$), kích thước của bầy đàn (population size = 50) và các hệ số tăng tốc của cá thể và quần thể (c_1 và c_2), hệ số quán tính (w). Lưu ý rằng hệ số quán tính là thành phần quyết định sự hội tụ nhanh hay chậm của bầy đàn. Do đó, phương pháp yếu tố co lại của bầy đàn (constriction factor) sẽ được áp dụng vào trong nghiên cứu này và phương pháp yếu tố co lại của bầy đàn được trình bày bằng công thức sau [16]:

$$\chi = \frac{2k}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (10)$$

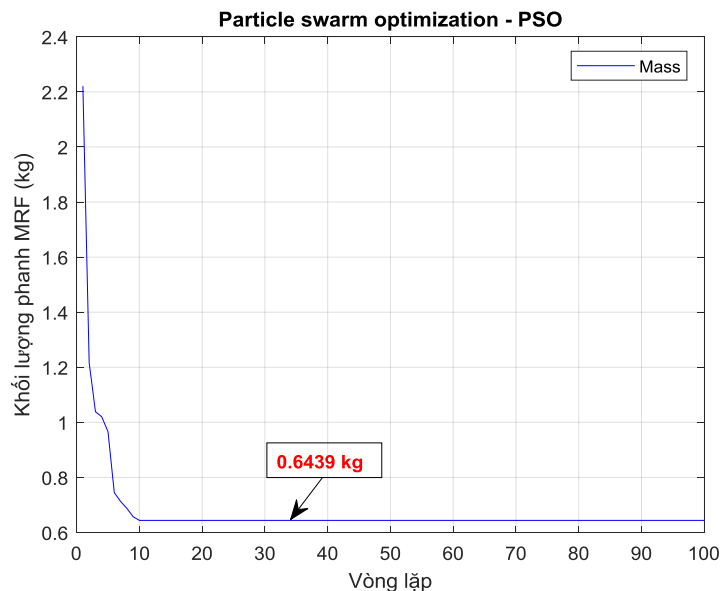
Trong đó, $k=1$, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, $\varphi > 4$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 2.05$ và các hệ số tăng tốc của cá thể (c_1) và quần thể (c_2): $c_1 = \chi\varphi_1$, $c_2 = \chi\varphi_2$, $w = \chi$ [16].

4.3 Kết quả tối ưu hóa

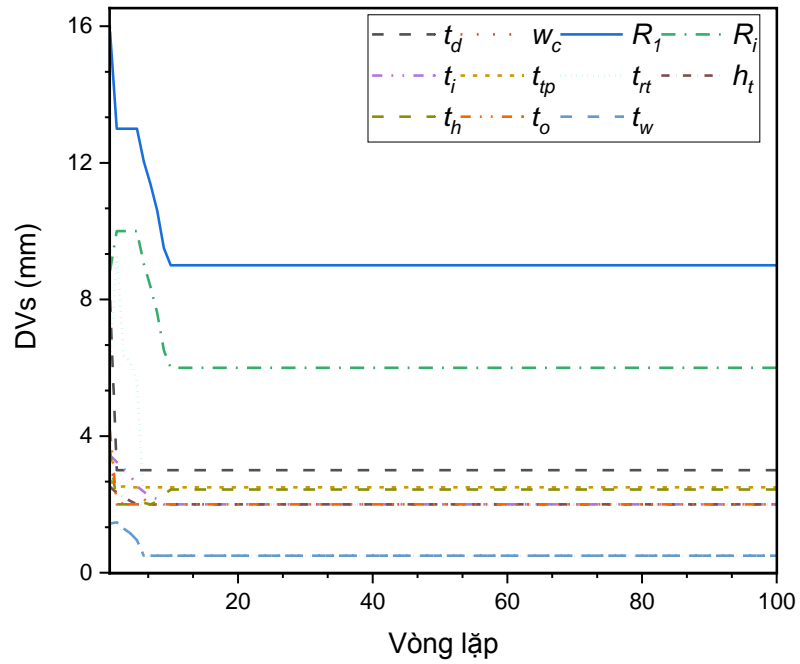
Trong phần này, kết quả tối ưu hóa của phanh MRF sẽ được trình bày và thảo luận chi tiết. Các vật liệu từ tính như là vỏ phanh, đĩa phanh là được làm từ vật liệu thép S45C và các vật liệu còn lại được làm từ vật liệu kháng từ như inox, nhôm. Lưu chất sử dụng là MRF132-DG do công ty Lord sản xuất và phốt chấn chấn dầu (Parker-62576) nhằm mục đích ngăn chặn lưu chất khi làm việc (MRF) bị rò rỉ ra ngoài. Tuy nhiên, kích thước khe hở MRF càng nhỏ dẫn đến mô men phanh cao nhưng lại có một số nhược điểm như làm giảm hiệu suất của phanh về năng lượng tiêu hao, nhiệt độ cao và lực phản hồi của hệ thống kém chính xác (do mô men ma sát ban đầu cao). Thêm vào đó, kích thước khe hở MRF nhỏ thì dẫn đến chi phí gia công cao và khó khăn chế tạo. Từ các yếu tố trên, để tạo thuận lợi cho việc thiết kế và chế tạo cũng như làm giảm được các nhược điểm trên thì khe hở MRF (d) được chọn theo kinh nghiệm là 0.8mm. Ngoài ra, kích thước cuộn dây đồng là 24-gauge với dòng điện làm việc tối đa là 3A và đường kính là 0.511mm được sử dụng trong nghiên cứu này. Xét đến trường hợp làm việc an toàn và ổn định, thì dòng điện tối đa cấp cho cuộn dây trong quá trình vận hành là 2.5A, trong khi xét đến việc tổn thất từ và tỷ lệ quán dây được chọn là 0.7 và 10% dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm. Tất cả các thông số điều là thông số khai báo quan trọng trong quá trình giải bài toán tối ưu hóa.

THIẾT KẾ VÀ TÍNH TOÁN TỐI ƯU HỆ THỐNG...

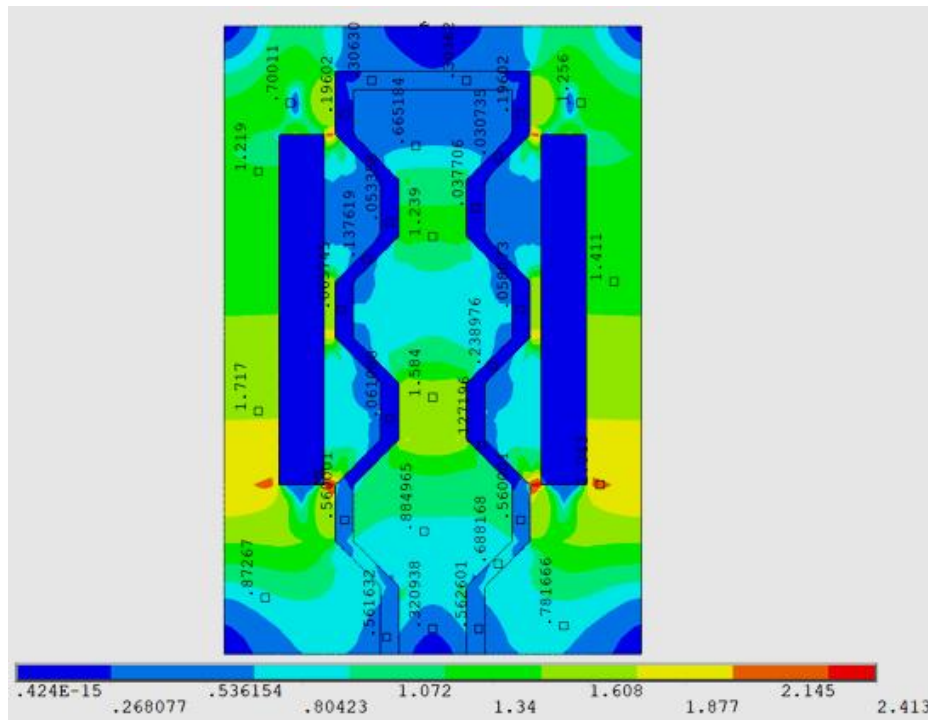
Sau lần lặp 100, kết quả tối ưu của phanh MRF hội tụ tại vòng lặp 10th là khối lượng phanh ($m_b=0.6439\text{kg}$) và mô men phanh tại thời điểm tối ưu ($t_b=5.118\text{Nm}$). Hình 7a, Hình 7b lần lượt cho thấy kết quả của hàm mục tiêu (khối lượng phanh MRF) và các biến thiết kế (DVs) thay đổi trong suốt quá trình tối ưu hóa sử dụng phương pháp PSO. Thêm vào đó, Hình 7c cho thấy mật độ từ trường của phanh MRF được đề xuất tại thời điểm tối ưu. Có thể thấy rằng mật độ từ trường qua khe hở MRF của phanh MRF tại thời điểm tối ưu là thấp hơn so với mật độ từ trường tại thời điểm các biến thiết kế ngẫu nhiên, nhưng khối lượng phanh MRF (0.6439kg) là nhỏ hơn so với khối lượng của phanh MRF khi biến thiết kế đầu vào ngẫu nhiên (2.735 kg) và mô men phanh tại thời điểm tối ưu (5.118Nm) là nhỏ hơn so với mô men khi các biến thiết kế đầu vào ngẫu nhiên (32.826Nm). Đồng thời mô men phanh tại thời điểm tối ưu (0.022Nm) là nhỏ hơn so với mô men phanh tại thời điểm ban đầu (0.13Nm). Mặc khác, có thể nhận xét rằng mật độ từ trường của phanh MRF có rotor dạng hình răng (với yêu cầu mô men phanh là 5Nm) là chưa cho thấy sự hiệu quả rõ về mật độ từ trường tại vùng hình răng trong phanh MRF. Tuy nhiên, ưu điểm của dạng phanh MRF này là có khối lượng nhỏ gọn hơn so với các loại phanh MRF cùng loại trong những nghiên cứu trước (với mức mô men phanh là 5Nm) [8,13]. Từ đó, để mà có thể đánh giá được mức độ hiệu quả của mật từ trường tại vùng hình răng trong phanh MRF này cần phải tăng yêu cầu mô men phanh lên. Nhưng cần điều khiển 3D phản hồi lực chỉ cần mô men phanh tối đa là 5Nm để đạt được lực phản hồi mong muốn. Do đó, kết quả tối ưu của phanh MRF là thỏa mãn điều kiện đạt ra cho bài toán tối ưu hóa này. Cuối cùng, Bảng 2 sẽ tóm tắt lại kết quả tối ưu bằng phương pháp PSO của phanh MRF sử dụng cho cần điều khiển 3D phản hồi lực được đề xuất.



a) Khối lượng phanh MRF.



b) Các biến thiết kế của phanh MRF.



c) Mật độ từ trường của phanh MRF.

Hình 7: Kết quả tối ưu của phanh MRF.

Bảng 2: Kết quả và thông số biến thiết kế tại thời điểm tối ưu.

Các thông số biến thiết kế	Các thông số đặc trưng
$t_d = 3\text{mm}$; $w_c = 2\text{mm}$; $h_c = 15.49\text{mm}$; $R_i = 6\text{mm}$; $R_1 = 9\text{mm}$; $t_i = 2\text{mm}$; $t_p = 2.5\text{mm}$; $t_{tb} = 2.49\text{mm}$; $d_i = 6.49\text{mm}$; $h_t = 2\text{mm}$; $t_{rt} = 2\text{mm}$; $t_w = 0.5\text{mm}$; $t_o = 2\text{mm}$; $t_h = 2.43\text{mm}$ $L = 23.07\text{mm}$; $R = 33.79\text{mm}$	Khối lượng phanh: $m_b = 0.6439\text{kg}$ Mô men ban đầu: $t_{b0} = 0.022\text{Nm}$ Mô men phanh: $t_b = 5.118\text{Nm}$ Công suất tiêu thụ điện: 17.197W Số vòng quán: 122 Điện trở cuộn dây: 1.375Ω

5 KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, một cơ cấu cần điều khiển 3D phản hồi lực đã được thiết kế như là một cơ cấu chủ động (Master) dùng để điều khiển các cơ cấu bị động (Slaver). Sau khi tổng hợp các bài báo có liên quan đến nghiên cứu và rút ra được điểm mạnh và điểm yếu của các nghiên cứu trước có liên quan, chúng tôi đã đề xuất một cấu hình của cần điều khiển 3D phản hồi lực nhằm để khắc phục những thiếu sót của các nghiên cứu trước. Để mà tạo ra lực phản hồi thì cơ cấu phanh MRF đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra lực phản hồi, cho nên chúng tôi tập trung vào việc đưa ra thiết kế phanh MRF mới được đề xuất sử dụng cho cơ cấu cần điều khiển 3D phản hồi lực này. Dựa trên phương pháp phân tử hữu hạn để thiết kế tối ưu phanh MRF đã được đề xuất bằng cách sử dụng phương pháp tối ưu hóa PSO. Kết quả tối ưu thu được của phanh MRF lần lượt là khối lượng phanh (0.6439kg) và mô men phanh (5.118Nm). Có thể thấy rằng kết quả tối ưu là thỏa mãn bài toán tối ưu hóa đặt ra và lực phanh mong muốn. Thêm vào đó, động học của cần điều khiển 3D cũng được trình bày ở phần 3.2. Hướng phát triển trong nghiên cứu tiếp theo, chế tạo mô hình để thực nghiệm kiểm tra kết quả lực phản hồi, tìm ra mối quan hệ giữa lực phản hồi và mô men phanh.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại Công nghiệp TP HCM theo hợp đồng của đề tài cấp trường số 129/HĐ-DHCN với mã số đề tài 22/1CK03

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Q.H. Nguyen, L.D. Hiep, B.Q. Duy, S.B. Choi "Development of a New Clutch Featuring MR Fluid with Two Separated Mutual Coils," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 371, pp. 835-844, 2016.
- [2] D.Q. Bui, V.L. Hoang, H.Q. Nguyen "Design and Evaluation of a Shear-Mode MR Damper for Suspension System of Front-Loading Washing Machines," *Proceedings of the International Conference on Advances in Computational Mechanics 2017*, pp. 1061-1072, 2017. DOI.org/10.1007/978-981-10-7149-2_74.
- [3] N.D. Nguyen, T.L. Duc, Q.H. Nguyen, "Development of a new magnetorheological fluid-based brake with multiple coils placed on the side housings," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 30, no. 5, 2018. DOI.org/10.1177/1045389X18818385.
- [4] K.H. Kim, Y.J. Nam, R. Yamane, M.K. Park, "Smart mouse: 5-DOF haptic hand master using magneto-rheological fluid actuators," *Journal of Physics: Conference Series: Conference on electrorheological fluids and magnetorheological suspensions*, vol. 149, no. 1, 2009. DOI 10.1088/1742-6596/149/1/012062.
- [5] S.H. Winter, M. Bouzit, "Use of Magnetorheological Fluid in a Force Feedback Glove," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15, no. 1, 2007. DOI: 10.1109/TNSRE.2007.891401.
- [6] C. Bullion, H. Gurocak, "Haptic Glove with MR Brakes for Distributed Finger Force Feedback," *Presence: MIT Press*, vol. 18, no. 6, pp. 421-433, 2009. DOI: 10.1162/pres.18.6.421.
- [7] W.H. Li, B. Liu, P.B. Kosasih, X.Z. Zhang, "A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications," *Sensor and Actuator A: Physical*, vol. 137, no. 2, pp. 308-320, 2007. DOI.org/10.1016/j.sna.2007.03.015.
- [8] Q.H. Nguyen, S.B. Choi, Y.S. Lee, M.S. Han, "Optimal design of a new 3D haptic gripper for telemanipulation, featuring magnetorheological fluid brakes," *Smart Material and Structures*, vol. 22, no. 1, 2012. DOI 10.1088/0964-1726/22/1/015009.
- [9] B.T. Diep, N.D. Nguyen, T.T. Tran, Q.H. Nguyen, "Design and Experimental Validation of a 3-DOF Force Feedback System Featuring Spherical Manipulator and Magnetorheological Actuators," *Smart Material and Structures*, vol. 19, no. 1, 2020. DOI:10.3390/act9010019.
- [10] T.B. Diep, H.D. Le, C.V. Vo, H.Q. Nguyen, "Performance Evaluation of a 2D-Haptic Joystick Featuring Bidirectional Magneto-Rheological Actuators," *International Conference on Advances in Computational Mechanics:*

- Proceedings of the International Conference on Advances in Computational Mechanics 2017*, pp. 1051-1059, 2017. DOI:10.1007/978-981-10-7149-2_73.
- [11] M.I. Varela-Jiménez, J. L.V. Luna, J. A. Cortes-Ramirez, G. Song, “Constitutive model for shear yield stress of magnetorheological fluid based on the concept of state transition,” *Smart Material and Structures*, vol. 24, no. 4, pp. 045-039, 2015. DOI: 10.1088/0964-1726/24/4/045039.
- [12] Q.H. Nguyen, S.B. Choi, “Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume,” *Smart Materials and Structures*, vol. 21, no. 1, 2011. DOI 10.1088/0964-1726/21/1/015012.
- [13] V. Q. Nguyen, D.T. Le, D.H. Le, Q.H. Nguyen, S.B. Choi, “Material Characterization of MR Fluid on Performance of MRF Based Brake,” *Frontiers in Materials*, vol. 6, 2019. DOI.org/10.3389/fmats.2019.00125.
- [14] J. Denavit, R.S. Hartenberg, “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices,” *J. Appl. Mech.*, vol. 22, no. 2, 1955. DOI.org/10.1115/1.4011045.
- [15] H. Zhu, Y. Wang, K. Wang, Y. Chen, “Particle Swarm Optimization (PSO) for the constrained portfolio optimization problem,” *Expert System with Applications*, vol. 38, no. 8, 2011. DOI.org/10.1016/j.eswa.2011.02.075.
- [16] G. Pranava, P.V. Prasad, “Constriction Coefficient Particle Swarm Optimization for Economic Load Dispatch with valve point loading effects,” *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, 2013. DOI: 10.1109/ICPEC.2013.6527680.

DESIGN AND OPTIMAL CALCULATION FOR THE 3D HAPTIC JOYSTICK USING MR BRAKES

DIEP BAO TRI*, VU VAN BO, NGUYEN QUOC HUNG

Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City

diepbaotri@iuh.edu.vn

Abstract. This research aims to create and assess the responsiveness of the 3D haptic system that uses three MRBs (Magneto-Rheological Brakes) through a gimbal mechanism. A 3D haptic joystick configuration is suggested after a review of relevant research on force feedback systems using MRF actuators. The gimbal mechanism combines the three MRBs used in this 3D haptic joystick configuration perpendicularly to create force feedback for each distinct rotational motion (X, Y, Z) of the suggested haptic system. Afterward, The Bingham plastic rheological model and the finite element method were used in the design and modeling of these MRBs for the 3D haptic joystick. Particle swarm optimization (PSO) method is employed to tackle the objective optimization problem for MRBs in order to decrease the mass as well as the manufacturing costs of the suggested MRBs. After having the optimal results, the 3D haptic joystick model was built and evaluated the feedback force. Subsequently, the research of force feedback in the field of remote control, which will be potentially applied to the Master-Slave system and popular in the future.

Keywords. Feedback force, 3D haptic joystick, PSO, MR brake.

Ngày gửi bài: 16/04/2023

Ngày chấp nhận đăng: 13/09/2023