

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HCM**

DIỆP BẢO TRÍ

**PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG PHẦN HỒI LỰC
DÙNG LƯU CHẤT TỪ BIẾN**

Chuyên ngành: Cơ Kỹ Thuật
Mã số chuyên ngành: 9520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2021

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: **PSG.TS. Nguyễn Quốc Hưng**
Người hướng dẫn khoa học 2: **TS. Mai Đức Đãi**

Luận án được bảo vệ trước
HỘI ĐỒNG ĐÁNH GIÁ LUẬN ÁN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM,

TÓM TẮT

Tự động hóa là một khía cạnh quan trọng của Công nghiệp 4.0 để cải thiện độ chính xác và năng suất. Để đánh giá hiệu quả và năng suất của quá trình sản xuất, có một số tiêu chí cần xem xét: tính ổn định, thời gian đáp ứng, tiêu thụ năng lượng, thân thiện với môi trường, chi phí và công nghệ... Tính cấp thiết áp dụng công nghệ 4.0 trong những môi trường làm việc độc hại chẳng hạn như lò phản ứng hạt nhân, phòng thí nghiệm hóa chất độc hại, dây chuyền sản xuất và pha chế thuốc trừ sâu, chữa cháy, các hoạt động chống khủng bố, bom mìn, và giải phẫu y tế. Hệ thống robot điều khiển từ xa đã được phát triển để giải quyết vấn đề này. Một trong những hệ thống đó là hệ thống chủ - tớ. Hệ thống này giải quyết các vấn đề với các tín hiệu phản hồi như vị trí, lực và mô-men của các thành phần cuối của hệ thống điều khiển thụ động cho người vận hành để cải thiện độ chính xác và hoạt động linh hoạt của hệ thống. Hiện nay, các vật liệu thông minh và ứng dụng của chúng đang phát triển rất mạnh mẽ như Piezo, Electrorheological Fluid (ERF), Shape Memory Alloy (SMA) và Magneto-Rheological Fluid (MRF). Lưu chất từ tính (MRFs) là vật liệu thông minh được ứng dụng rộng rãi cho hệ thống phản hồi lực vì có những ưu điểm như đáp ứng nhanh, tiêu thụ năng lượng thấp, tạo lực và mô men lớn. Tuy nhiên, trong các hệ thống phản hồi lực sử dụng MRF vẫn còn một số tồn tại như kết cấu quá cồng kềnh do cơ cấu tác động đề xuất chưa được tối ưu hóa, lực ma sát ở trạng thái chưa được giải quyết. Vì vậy, trong luận án này, tác giả tập trung nghiên cứu và phát triển các cơ cấu mới có tính năng MRF để tạo ra mô men, lực có thể điều khiển được, sau đó được áp dụng trong các hệ thống phản hồi lực. Luận án bao gồm các nội dung chính sau:

- Phát triển cơ cấu tác động hai chiều sử dụng MRF (BMRA) giảm được mô men ma sát ban đầu, giải quyết hiện tượng thắt nút cổ chai so với cơ cấu BMRA trước đây để ứng dụng cho hệ thống phản hồi lực.
 - Tối ưu hóa các thông số hình học của cấu hình BMRA đề xuất bằng phương pháp tối ưu First Order. Bên cạnh đó, sử dụng tối ưu hóa đa
-

mục tiêu NSGA để khảo sát tính ưu việt của cấu hình đề xuất so với cấu hình đã nghiên cứu trước đó.

- Phát triển hệ thống joystick 3D phản hồi lực sử dụng các BMRA và phanh MRF tịnh tiến (LMRB) được đề xuất.
- Xây dựng mô hình toán và các bộ điều khiển cho các hệ thống phản hồi lực để đánh giá khả năng của hệ thống.
- Phát triển phanh sử dụng MRF (MRB) với roto biên dạng phức tạp để có kích thước nhỏ gọn áp dụng cho tay máy xúc giác 3D.
- Phát triển tay máy xúc giác 3D sử dụng MRB biên dạng phức tạp và LMRB.

ABSTRACT

Automation is a key aspect of Industry 4.0 to improve accuracy and productivity. To evaluate the efficiency and productivity of the production process, there are several criteria to take into consideration: stability, response time, energy consumption, environmental friendliness, cost, and technology... The urgency in the application of technology 4.0 is essential in hazardous working environments such as nuclear reactors, toxic chemical laboratories, pesticide production and preparation lines, fire fighting, anti-terrorism activities, mines, and clearance Medical surgery. Remote control robot systems have been developed to solve this problem. One of those systems is the master-slave system. This system solves problems with feedback signals such as position, force, and torque of the passive control system end components for the operator to improve accuracy and flexibility operation of the system. Currently, smart materials and their application have been developing very strongly such as Piezo, Electrorheological Fluid (ERF), Shape Memory Alloy (SMA), and Magneto-Rheological Fluid (MRF). Magnetic fluids (MRFs) are smart materials that are widely applied to force feedback systems because of their advantages such as fast response, low energy consumption, large force, and torque generation. However, in the force feedback systems using MRF, there are still some shortcomings such

as the structure is too cumbersome because the proposed impact mechanism is not optimized, the friction force in the state has not been resolved. Therefore, in this thesis, the author focuses on research and development of new mechanisms featuring MRF to generate controllable torque/ force, which is then implemented in force feed-back system. The thesis includes following main contents:

- Development of a bidirectional MRF based actuator (BMRA) for the feedback system. Force to provide a controllable torque in both directions which can eliminate frictional torque, solving bottleneck problems compared to previous BMRA mechanisms.
 - Optimization of the geometric parameters of the proposed BMRA configuration by the First Order optimization method. Besides, using NSGA multi-target optimization to investigate the overall performance of the proposed configuration and compared to the previously studied configuration.
 - Development of a 3D-force-feedback joystick system using two of the proposed BMRAs and a linear braking featuring MRF (LMRB).
 - Constructing mathematic models and controllers for force feedback systems to evaluate the system's capabilities.
 - Development of MR brake (MRB) with complex-shaped rotor to achieve compact size for a 3D haptic manipulator.
 - Development of a 3D haptic manipulator featuring complex-shaped rotor MRBs and a LMRB.
-

Chương 1. TỔNG QUAN

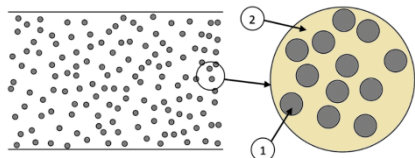
1.1 Giới thiệu về lưu chất từ biến. (MRF)

Lưu chất từ biến là lưu chất thay đổi các tính chất lưu biến như độ nhớt, ứng suất chảy dưới tác dụng của từ trường. MRF đã được Jacob Rabinow nghiên cứu tại Cục tiêu chuẩn quốc gia Hoa Kỳ vào cuối những năm 1940s [1]. Đặc điểm từ tính của lưu chất từ biến bao gồm ứng suất chảy dẻo, độ nhớt sau chảy dẻo và độ lắng đọng [2, 3]. Tính lưu biến này phụ thuộc vào các tham số biến đổi khác nhau như tỷ trọng hạt từ tính, loại hạt từ tính, mật độ các hạt từ tính, cường độ từ trường, nhiệt độ, tính chất của chất lỏng nền và loại chất phụ gia [4].

1.2 Đặc điểm MRF.

1.2.1 Thành phần chính MRF. (Hình 1.1)

- Hạt từ tính (1): hạt của MRF hiện nay được sử dụng như sắt, hợp kim sắt, oxit sắt, nitrat sắt, cacbua sắt, sắt carbonyl, niken và coban [6, 7]. Kích thước hạt từ tính nằm trong khoảng 0,1-10 μm .

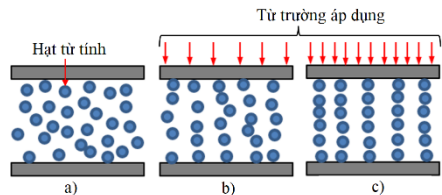


Hình 1.1 Thành phần chính MRF.

- Chất lỏng nền (2): là dầu silicon, dầu khoáng, dầu parafin, dầu thủy lực, chất lỏng hữu cơ như halogen, silic fluoride và dầu hydrocarbon tổng hợp [7].
- Chất phụ gia: được thêm vào nhằm làm giảm sự lắng đọng của các hạt trong MRF. Hiện tượng lắng đọng này sẽ làm giảm hiệu suất của MRF [8]

1.2.2 Nguyên lý hoạt động MRF.(Hình 1.2)

Khi MRF ở trạng thái không có từ trường đi qua thì các hạt từ tính chuyển động tự do và lưu chất ứng xử như lưu chất Newton. Khi MRF có tác dụng của từ trường bên ngoài vào thì các hạt từ tính sẽ gắn kết và sắp xếp lại với nhau theo hình dạng phân bố của đường sức từ. Các hạt từ có khả năng chống lại sự phá vỡ liên kết, làm cho lưu chất sệt lại.



Hình 1.2. Các trạng thái MRF.

1.2.3 Các chế độ làm việc của MRF.

Theo nghiên cứu [9] gồm bao gồm: chế độ dòng chảy (*valve mode*), Chế độ trượt (*shear mode*) và Chế độ nén (*squeeze mode*).

1.3 Tình hình nghiên cứu hệ thống phản hồi lực hiện nay.

1.3.1 Nghiên cứu trong nước.

- Từ Diệp Công Thành [10] nghiên cứu hệ tay máy Master và Slave sao chép chuyển động điều khiển từ xa, việc nghiên cứu dừng tại sao chép chuyển động.
- Nguyễn Ngọc Diệp [11] phát triển đề tài “*Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình tay máy sao chép chuyển động và phản hồi lực*” vẫn tồn tại một số nhược điểm do vẫn sử dụng phanh MRF kiểu truyền thống.

1.3.2 Nghiên cứu nước ngoài.

Li W. H cùng các cộng sự [12] đã đưa ra hệ phản hồi lực joystick 2D với hai phanh dùng MRF. Các phanh được sử dụng vẫn là các phanh truyền thống và việc tối ưu hoá hình học chưa xem xét nên kết cấu và ma sát ban đầu còn lớn.

Nguyen P. B và các cộng sự [13] đã thiết kế và chế tạo cơ cấu joystick 2D phản hồi lực sử dụng cơ cấu quay hai chiều dùng MRF. Tuy nhiên vẫn sử dụng kiểu quấn dây truyền thống dẫn tới hiện tượng thắt nút cổ chai và việc tối ưu hoá hình học chưa được xem xét nên kết cấu còn khá lớn, mô men đầu ra chỉ 1,2 Nm.

1.4 Kết luận.

Thông qua các nghiên cứu trên, tác giả nghiên cứu và phát triển mô hình và ứng xử mới của MRF cho cơ hệ của mình. Đồng thời tiến hành phân tích, tính toán, tối ưu hóa các thông số hình học với ràng buộc của hệ thống và tiến hành xây dựng bài toán điều khiển để đáp ứng cho hệ thống.

1.5 Mục tiêu nghiên cứu.

1.5.1 Mục tiêu chính: hệ thống phản hồi lực dùng MRF có khả năng:

- Phản hồi chính xác lực 3D; giảm thiểu tối đa ảnh hưởng của lực ma sát lên tay người điều khiển; đánh giá khả năng đáp ứng của hệ thống phản hồi lực.

1.5.2 Mục tiêu cụ thể.

- Phát triển cơ cấu tác động hai chiều dùng MRF (BMRA);
- Phát triển phanh MRF tuyến tính (LMRB) có khả năng kiểm soát lực dọc trục.

-
- Phát triển hệ thống phản hồi lực 3D với sự kết hợp của BMRA và LMRB.
 - Phát triển phanh MRF biên dạng răng (MRB) với mục đích là giảm khối lượng và tăng mô men đầu ra cho MRB.
 - Phát triển tay máy phản hồi lực 3D dựa vào sự kết hợp của MRB và LMRB.

1.6 Phạm vi nghiên cứu.

Hệ thống phản hồi lực 3D; lưu chất nghiên cứu là MRF132-DG; tốc độ điều khiển khoảng 2 rad/s; bộ điều khiển áp dụng PID, SMC.

1.7 Phương pháp nghiên cứu và cách tiếp cận.

- Phương pháp số: đạo hàm bậc nhất, NSGA-II, bộ điều khiển PID và SMC.
- Đối tượng nghiên cứu là các cơ cấu tác động dùng MRF
- Các kết quả tối ưu và thực nghiệm được kiểm tra tính đúng đắn và độ tin cậy.

1.8 Tính mới của đề tài.

Các điểm mới của nghiên cứu này so với các nghiên cứu trước:

- Phát triển cơ cấu hai chiều mới khắc phục hiện tượng thất nút cổ chai, bão hòa từ cục bộ, giảm khối lượng cơ cấu so với cơ cấu của tác giả Nguyen P. B [27].
- Tối ưu các thông số hình học của BMRA, MRB và LMRB với mục tiêu là khối lượng nhỏ nhất và điều kiện ràng buộc là mô men đầu ra của cơ cấu
- Phát triển hệ thống phản hồi lực 3D sử dụng BMRA và LMRB đã đề xuất.
- Phát triển tay máy phản hồi lực 3D sử dụng MRB và LMRB đã đề xuất.
- Xây dựng mô hình toán cho hệ thống phản hồi lực 3D.
- Xây dựng các bộ điều khiển cho hệ thống phản hồi lực được đề xuất

Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Các đặc tính cơ bản của MRF.

- *Đặc tính từ tính tĩnh*: từ tính của MRF khả năng cho phép từ thông chạy qua lưu chất, đặc trưng bởi độ từ thẩm μ . Với quan hệ [14]: $B = \mu \cdot H$ (2-1)

Trong đó B là mật độ từ thông, H là cường độ từ trường.

- *Đặc tính độ nhớt*: chịu ảnh hưởng bởi hai yếu tố đó là độ nhớt của chất lỏng nền và mật độ hạt từ tính. Đây cũng là một trong những thông số lưu biến

được sử dụng để xác định đặc tính ứng xử của vật liệu phi Newton [15].

$$\text{Phương trình độ nhớt : } \eta_r = 1 + 2.5\phi \quad (2-2)$$

Với η_r là độ nhớt tương đối, ϕ là thể tích của các chất hòa tan

- *Độ bền* : sau một thời gian làm việc lưu chất có thể mất đi những đặc tính ban đầu với nhiều lý do khác nhau chủ yếu mài mòn hạt từ tính.

2.2 Mô hình toán áp dụng cho MRF.

$$\text{Mô hình dẻo Bingham [5]: } \tau = \tau_y(H) \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta\dot{\gamma} \quad (2-3)$$

Với τ : ứng suất cắt; τ_y : ứng suất chảy dẻo; Sgn : hàm dấu; η : độ nhớt sau chảy dẻo; $\dot{\gamma}$: tốc độ cắt của lưu chất.

Các tính chất lưu biến của MRF được xác định bằng công thức sau [5]:

$$Y = Y_\infty + (Y_0 - Y_\infty)(2e^{-B\alpha_{SY}} - e^{-2B\alpha_{SY}}) \quad (2-4)$$

Y là thông số lưu biến của MRF như ứng suất chảy (τ_y), độ nhớt (μ)

$$\tau_y = \tau_{y\infty} + (\tau_{y0} - \tau_{y\infty})(2e^{-B\alpha_{sty}} - e^{-2B\alpha_{sty}}) \quad (2-5)$$

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)(2e^{-B\alpha_{s\mu}} - e^{-2B\alpha_{s\mu}}) \quad (2-6)$$

Giá trị các tham số Y có xu hướng từ Y_0 đến giá trị bão hòa Y_∞ ; α_{SY} là chỉ số mô men bão hòa của tham số Y ; B là mật độ thông.

2.3 Mô men ma sát trong rãnh MRF.

2.3.1 Mô men ma sát trên rãnh mặt đầu (I).

Xét phanh đĩa đơn (Hình 2.1), đĩa quay với vận tốc ω (rad/s). Mô men được tính như sau [16]:

$$T = \frac{2\pi \cdot \mu_{eq} R^4}{(n+3)t_g} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_0} \right)^{n+3} \right] \omega + \frac{2\pi\tau_y}{3} (R_0^3 + R_i^3) \quad (2-7)$$

2.3.2 Mô men ma sát trên mặt trụ ngoài (II).

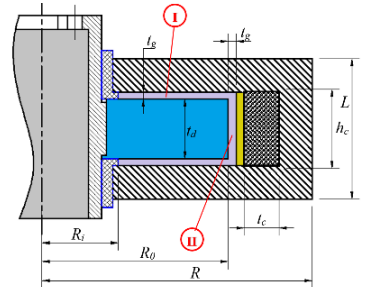
Mô men ma sát tại (II) được tính [17]:

$$T_a = 2\pi \cdot R_0^2 b_a \tau_{R_0} \quad (2-8)$$

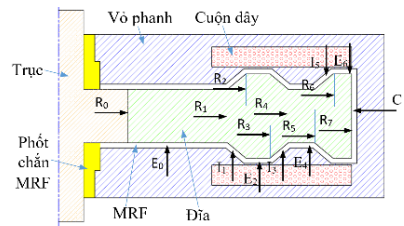
2.3.3 Mô men ma sát trên rãnh nghiêng.

Xét phanh MRF có biên dạng đĩa gồm có rãnh nghiêng (I_1, I_3, I_5) (Hình 2.2). Mô men ma sát trên rãnh nghiêng theo [17]:

$$T_{I_i} = 2\pi \left(R_i^2 l + R_i l^2 \sin\phi + \frac{1}{3} l^3 \sin^2\phi \right) \tau_{yI_i} + \frac{1}{2} \pi \mu_{I_i} \frac{\pi}{d} (4R_i^3 + 6R_i^2 l \sin\phi + 4R_i l^2 \sin^2\phi + l^3 \sin^3\phi); \quad (i = 1,3,5) \quad (2-9)$$



Hình 2.1. Kết cấu đĩa đơn của MRB



Hình 2.2. Kết cấu của BMR

2.4 Lực ma sát trượt cơ cấu tuyến tính dùng MRF (LMRB).

Xét một LMRB có cấu tạo và thông số hình học cơ bản (Hình 2.3). Khi đó lực ma sát trượt sinh ra bởi LMRB được tính [18]:

$$F_{sd} = 2\pi \cdot \mu R_s L v / t_g + 2\pi \cdot R_s L \tau_y \quad (2-10)$$

Với R_s là bán kính trục; d là kích thước khe MRF; v là vận tốc tương đối giữa trục và vỏ; L là chiều dài của ống MRF; R là bán kính LMRB.

2.5 Mô men ma sát giữa phốt và trục.

Đối với phanh (Hình 2.1, Hình 2.2) thì mô men ma sát được tính theo [19]:

$$T_{sf} = 0,65(2R_s)^2 \omega^{1/3} \quad (2-11)$$

T_{sf} : mô men sinh ra do ma sát của phốt với trục (Oz -in); R_s là bán kính trục

(inch); ω là tốc độ quay của trục (vòng/phút)

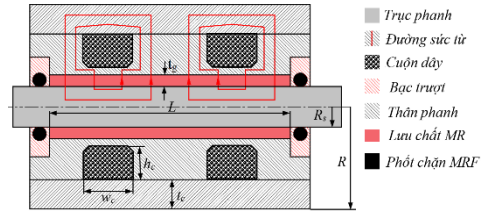
Đối với LMRB (Hình 2.3) sử dụng O-ring nên mô men ma sát giữa phốt và trục được tính theo [20]:

$$F_{or} = f_c L_o + f_h A_r \quad (2-12)$$

2.6 Phương pháp giải bài toán từ tính của MRF.

2.6.1 Phương pháp giải tích.

Chúng ta biết rằng mô hình hóa hệ thống dựa trên MRF là đi kết hợp phân tích điện từ và phân tích hệ thống lưu chất [21]. Mạch từ có thể được phân tích bằng định luật Kirchoff từ tính như sau:



Hình 2.3. Kết cấu LMRB

$$\sum H_k l_k = N_{turns} I \quad (2-13)$$

Trong đó H_k là cường độ từ trường trong liên kết thứ k của mạch từ; l_k là độ dài hiệu dụng của liên kết; N_{turns} là số vòng của cuộn dây; I là dòng điện áp dụng.

2.6.2 Phương pháp phần tử hữu hạn.

Kết hợp phương pháp phần tử hữu hạn với mô đun giải điện từ trường có sẵn trong phần mềm ANSYS sẽ giúp ta xác định được mật độ từ thông đi qua khe MRF. Khi sử dụng phương pháp này thì để kiểm soát tốt việc chia lưới theo mong muốn, tác giả dùng phần tử tứ giác cho tất cả các phần tử (phần tử đối xứng trục PLANE 13) của phần mềm ANSYS.

2.7 Cơ sở phương pháp tối ưu hoá.

- Phương pháp giảm độ dốc (Gradient Descent - GD) [22]
- Phương pháp giải thuật di truyền (Genetic Algorithms - GA) [23]
- Giải thuật di truyền sắp xếp không vượt trội II (NSGA-II) [24]

2.8 Cơ sở của phương pháp điều khiển.

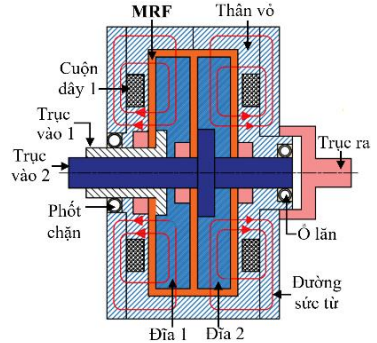
- Bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative) [25]
- Bộ điều khiển SMC (Sliding Mode Control) [26]

Chương 3. PHÁT TRIỂN CƠ CẤU HAI CHIỀU DÙNG MRF

3.1 Cơ cấu hai chiều dùng MRF (BMRA).

3.1.1 Nguyên lý cấu tạo.

Trên cơ sở BMRA của Nguyen P. B [27] và Nguyen Quoc Hung [35]. Nhóm đề xuất hai phương án cho BMRA là: BMRA1 có một cuộn dây ở mỗi bên (Hình 3.1), BMRA2 có hai cuộn dây ở mỗi bên. Về cấu tạo thì BMRA1 và BMRA2 hoàn toàn giống nhau chỉ có BMRA2 được bố trí 2 cuộn dây ở mỗi bên. Các BMRA hoạt động như sau: từ động cơ bên ngoài thông qua hệ bánh răng sẽ dẫn động hai trục vào 1 và 2 quay ngược chiều, mà hai đĩa được gắn cố định trên hai trục đầu vào nên dẫn tới hai đĩa 1 và 2 cũng được quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều. Một trục ra được gắn cố định với thân BMRA sẽ lấy mô men đầu ra của BMRA khi chúng hoạt động.



Hình 3.1. Kết cấu của BMRA1

3.1.2 Mô men đầu ra các BMRA:

$$\text{BMRA1: } T_{01} = T_1 - T_2 + T_{s1} - T_{s2} \quad (3-1)$$

Trong đó T_{01} : mô men đầu ra của BMRA1; T_1, T_2 là mô men sinh ra của đĩa 1, đĩa 2; T_{s1}, T_{s2} : mô men ma sát giữa phốt và trục 1, trục 2. Theo (2-7), (2-8):

$$T_1 = \frac{\pi\mu_{d11}R_{cl}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{cl}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd11}}{3} (R_{cl}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_{d12}R_{co}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{cl}}{R_{co}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd12}}{3} (R_{co}^3 - R_{cl}^3) + \frac{\pi\mu_{d13}R_d^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{yd13}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{yd14} + \mu_{d14} \frac{|\omega_1| R_d}{t_g}) \quad (3-2)$$

$$T_2 = \frac{\pi\mu_{d21}R_{ci}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{ci}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd21}}{3} (R_{ci}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_{d22}R_{co}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{ci}}{R_{co}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd22}}{3} (R_{co}^3 - R_{ci}^3) + \frac{\pi\mu_{d23}R_d^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{yd23}}{3} (R_d^3 - R_{co}^3) + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{yd24} + \mu_{d24} \frac{|\omega_2| R_d}{t_g}) \quad (3-3)$$

Tương tự cho BMRA2: $T_{o2} = T_{d1} - T_{d2} + T_{s1} - T_{s2} \quad (3-4)$

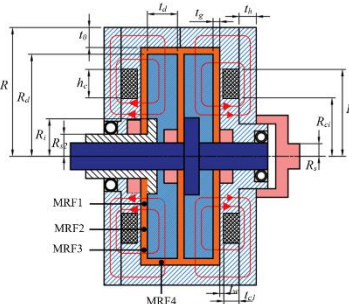
$$T_{d1} = \frac{\pi\mu_{11}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y11}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_{12}R_{co1}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{ci1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y12}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) + \frac{\pi\mu_{13}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y13}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) + \frac{\pi\mu_{14}R_{co2}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y14}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) + \frac{\pi\mu_{15}R_d^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_1| + \frac{2\pi\tau_{y15}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{d16} + \mu_{16} \frac{|\omega_1| R_d}{t_g}) \quad (3-5)$$

$$T_{d2} = \frac{\pi\mu_{21}R_{ci1}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{ci1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y21}}{3} (R_{ci1}^3 - R_i^3) + \frac{\pi\mu_{22}R_{co1}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{ci1}}{R_{co1}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y22}}{3} (R_{co1}^3 - R_{ci1}^3) + \frac{\pi\mu_{23}R_{ci2}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co1}}{R_{ci2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y23}}{3} (R_{ci2}^3 - R_{co1}^3) + \frac{\pi\mu_{24}R_{co2}^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{ci2}}{R_{co2}} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y24}}{3} (R_{co2}^3 - R_{co1}^3) + \frac{\pi\mu_{25}R_d^4}{2t_g} \left[1 - \left(\frac{R_{co2}}{R_d} \right)^4 \right] |\omega_2| + \frac{2\pi\tau_{y25}}{3} (R_d^3 - R_{co2}^3) + 2\pi R_d^2 t_d (\tau_{d26} + \mu_{26} \frac{|\omega_2| R_d}{t_g}) \quad (3-6)$$

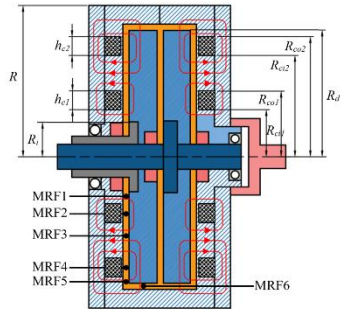
3.2 Thiết kế tối ưu cho các BMRA: Hàm mục tiêu của BMRA (m_b)

$$m_b = V_{d1}\rho_{d1} + V_{d2}\rho_{d2} + V_h\rho_h + V_{s1}\rho_{s1} + V_{s2}\rho_{s2} + V_{MRF}\rho_{MRF} + V_c\rho_c \quad (3-7)$$

Trong đó: V_{d1} , V_{d2} , V_h , V_{s1} , V_{s2} , V_{MRF} , V_c là thể tích của các bộ phận cấu tạo nên BMRA tương ứng đó là thể tích của đĩa 1, đĩa 2, vỏ, trục 1, trục 2, MRF và cuộn dây.



Hình 3.2. Kết cấu BMRA1



Hình 3.3. Kết cấu BMRA2

Khối lượng riêng tương ứng đó là ρ_{d1} , ρ_{d2} , ρ_h , ρ_{s1} , ρ_{s2} , ρ_{MRF} , ρ_c

- Biến thiết kế: tất các thông số hình học chủ yếu của BMRA.
- Điều kiện ràng buộc: mô men đầu ra của BMRA $T_b \geq 5 \text{ Nm}$

3.2.1 Tối ưu hoá một mục tiêu.

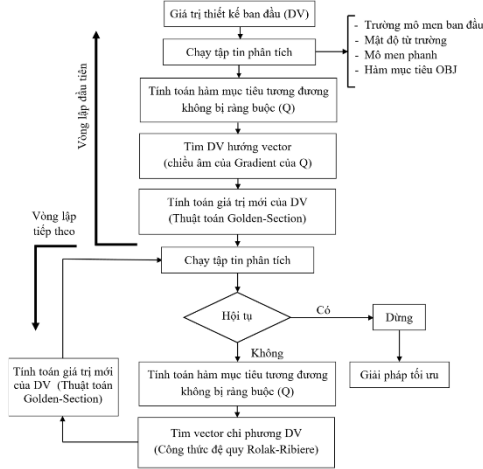
Sử dụng phương pháp First Order (Hình 3.4) Công cụ tối ưu hóa ANSYS sẽ chuyển đổi vấn đề tối ưu hóa bị ràng buộc thành vấn đề không bị ràng buộc thông

qua hàm Penalty (hàm phạt). Hàm mục tiêu tương đương không ràng buộc có phương trình: $Q(x, q) = \frac{OBJ}{OBJ_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + q \sum_{i=1}^m P_g(g_i)$ (3-8)

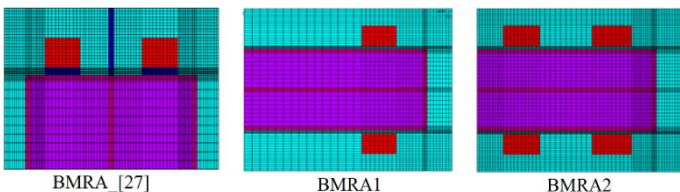
OBJ_0 là giá trị hàm mục với các biến thiết kế ban đầu; q là tham số bề mặt; P_x là hàm phạt cho biến thiết kế x ; P_g là hàm phạt Penalty biến trạng thái g

Việc chia lưới được xác định bởi số phần tử trên mỗi đường thẳng, khi số phần tử được chia trên mỗi đường lớn hơn hoặc bằng 10 thì kết quả mô phỏng đã hội tụ. Sai lệch khi tăng lưới từ 10 phần tử lên

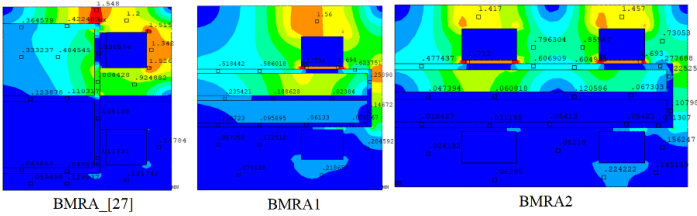
12 phần tử chỉ khoảng 0,2% đảm bảo được độ hội tụ mong muốn. Mô hình phần tử hữu hạn phân tích mạch từ (Hình 3.5). Tỷ lệ lấp đầy của cuộn dây được lấy bằng 80%, trong khi tổn thất từ trường được giả định là 10% dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm. Tỷ lệ hội tụ của tối ưu hóa được đặt 0,1%. Kết quả phân bố mật độ từ thông của BMRA ở mức tối ưu (Hình 3.6)



Hình 3.4. Lưu đồ tối ưu bằng phương pháp First Order

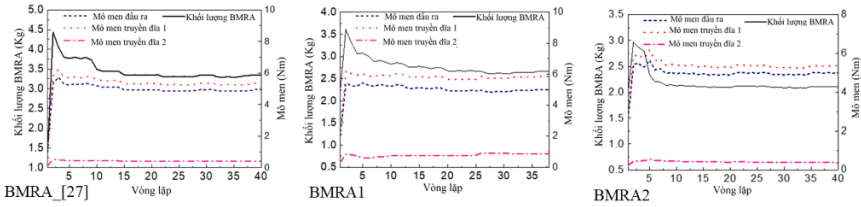


Hình 3.5. Mô hình phân tích mạch từ của BMRA



Hình 3.6. Phân bố mật độ từ thông của BMRA

Kết quả hội tụ của các BMRA (Hình 3.7), với $T_b \geq 5$ Nm với độ chính xác 2%, số vòng lặp bằng 40. Mô men xoắn truyền từ đĩa 1 cao hơn một chút so với mô men xoắn đầu ra (7,4% trong trường hợp BMRA_[27], 13% trong trường hợp BMRA1 và 7% trong trường hợp của BMRA2). Điều đó cho thấy rằng chênh lệch mô men xoắn truyền của BMRA_[27] nhỏ hơn BMRA1 do BMRA_[27] có sử dụng bộ phận cách từ. Đối với BMRA2 không có bộ phận cách từ mà chênh lệch về mô men truyền BMRA2 vẫn nhỏ hơn BMRA_[27].



Hình 3.7. Kết quả tối ưu của các BMRA

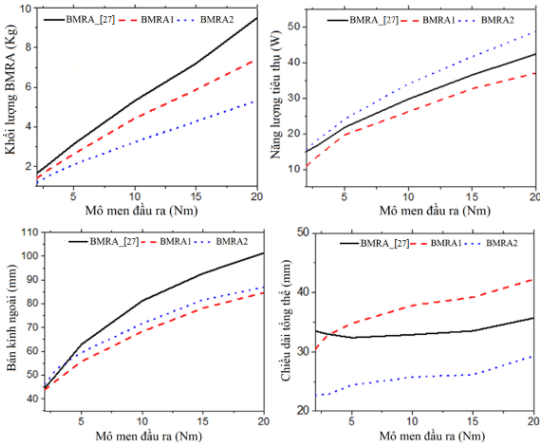
Bảng 3.1: Kết quả tối ưu của các BMRA

BMRA	Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
BMRA_[27]	$t_c = 6,3; h_c = 6,1; L_{a1} = 5,0; L_{a2} = 0,5$ $R_i = 36,3; R_o = 50,2; t_d = 11,9$ $R = 61,8; t_0 = 3,8; t_h = 3,1; L = 32,2$	$T_{max} = 4,96$ Nm $m_{max} = 3,21$ kg $P_w = 21,8$ W; $R_c = 49 \Omega$
BMRA1	$w_c = 5,6; h_c = 7,65; R_{ci} = 40,7$ $R_i = 21,5; R_o = 52,8; t_d = 4,2$ $R = 55,6; t_0 = 2; t_h = 5,83; L = 34,8$	$T_{max} = 4,97$ Nm $m_{max} = 2,64$ kg $P_w = 19,8$ W; $R_c = 3,2 \Omega$
BMRA2	$w_{c1} = w_{c2} = 4,25; h_{c1} = 7,4$ $h_{c2} = 6,2; R_{ci1} = 29; R_{ci2} = 47,5$ $R_i = 20; R_o = 56,6; t_d = 4; R = 59,4$ $t_0 = 2; t_h = 3,2; L = 24,3$	$T_{max} = 4,98$ Nm $m_{max} = 2,1$ kg $P_w = 24$ W; $R_{c1} = 1,68 \Omega$ $R_{c2} = 2,16 \Omega$

Áp dụng phương pháp First Order (Hình 3.4) kết quả cho bởi Hình 3.8. Mức mô men đầu ra lớn thì khối lượng của BMRA_[27] luôn cao hơn các BMRA được đề xuất, mức tiêu thụ điện của BMRA2 luôn cao hơn các BMRA khác và mức tiêu thụ điện của BMRA1 luôn nhỏ hơn BMRA_[27].

Về thông số bán kính ngoài (R) của BMRA_[27] cao hơn so với BMRA1 và BMRA2 tại $T > 5$ Nm, với $T < 5$ Nm thì bán kính ngoài của BMRA_[27] nhỏ hơn một chút so với BMRA2 nhưng luôn lớn hơn BMRA1, bán kính của BMRA1 luôn nhỏ hơn BMRA2.

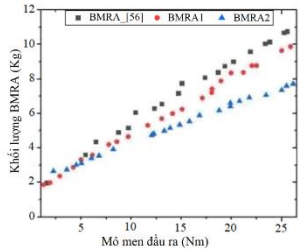
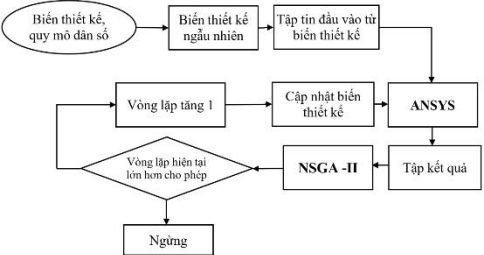
Bên cạnh đó chiều dài tổng thể (L) của BMRA2 nhỏ hơn đáng kể so với các BMRA khác. Ở mô men xoắn đầu ra cao thì chiều dài tổng thể của BMRA_[27] nhỏ hơn của BMRA1, khi $T < 5$ Nm thì trở nên lớn hơn.



Hình 3.8. Kết quả tối ưu bằng First Order

3.2.2 Tối ưu hoá đa mục tiêu cho BMRA.

Áp dụng thuật toán tối ưu di truyền sắp xếp không chi phối II (NSGA-II) [24]. Lược đồ tối ưu (Hình 3.9). Biểu đồ Pareto (Hình 3.10) của giải pháp tối ưu khi



Hình 3.9. Lược đồ tối ưu áp dụng NSGX-II **Hình 3.10.** Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu

các tham số của NSGA-II được thiết lập như sau: số lần lặp tối đa là 100, quy mô dân số bằng 20, tỷ lệ phần trăm chéo bằng 0,7%, phần trăm đột biến 0,005, tỷ lệ đột biến bằng 0,02. Kết quả (Hình 3.10) có thể thấy rằng kết quả tối ưu rất gần với kết quả mong muốn. Thực hiện với 50 bộ giá trị ngẫu nhiên của biến thiết kế. Từ kết quả, các giá trị của tham số thiết kế của trường hợp nào tốt nhất sẽ được chọn làm giá trị ban đầu của biến thiết kế trong thuật toán bậc nhất.

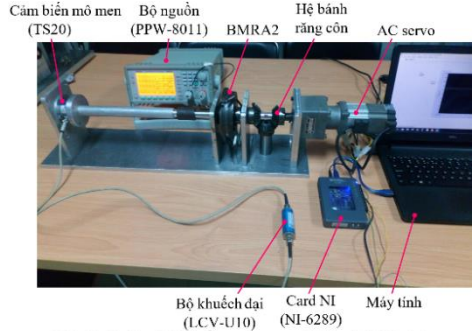
3.3 Thiết kế và hoàn thiện hệ thống thí nghiệm BMRA2.

Hệ thống thực nghiệm hoàn thiện được trình bày bởi Hình 3.11

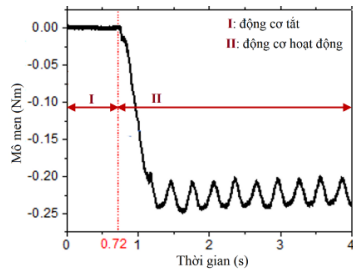
3.4 Kết quả thực nghiệm và đánh giá.

Kết quả mô men xoắn đầu ra khi không cấp dòng điện cho các cuộn dây (Hình 3.12) thay đổi từ 0 đến -0,22 Nm. Giá trị âm có nghĩa là mô men xoắn đầu ra cùng hướng của trục 1. Vì đường kính của trục vào 1 lớn hơn trục vào 2. Thời gian mô men xoắn đáp ứng ở trạng thái tắt là khoảng 30 ms. Thời gian đáp ứng này do độ trễ cơ học của BMRA.

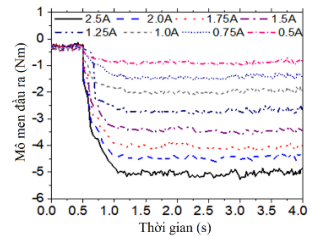
Khi cấp dòng điện dạng bậc (mức thay đổi là 0,25 A trong khoảng từ 0,5 A tới 2,5 A) cho các cuộn dây ở mặt bên của đĩa 1 tại thời điểm 0,5 s thì đáp ứng từng bước mô men đầu ra của BMRA (Hình 3.13) xấp xỉ 0,2 s. Mô men đầu ra trung bình đo được của BMRA khi dòng điện 2,5 A là khoảng 5,1 Nm lớn hơn với thiết kế tối ưu là 4,98 Nm. Nguyên nhân có thể do việc ước tính mô men ma sát và mô men truyền động chưa chính xác hoặc do tổn thất từ trường gây ra. Từ Hình 3.14 là kết quả mô men đầu ra mô phỏng như một hàm của dòng điện áp dụng, ta thấy rằng mô men đầu ra đo được cũng phù hợp với mô men mô phỏng và sai số dao động từ 1,5% đến 5%. Từ Hình 3.13 ta cũng thấy rằng trong mọi trường hợp giá trị ổn định của mô men đo được hầu như đạt được tại thời điểm



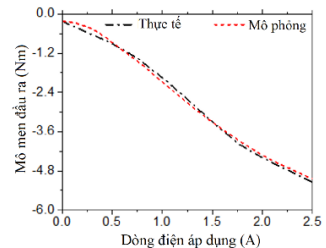
Hình 3.11. Hệ thống thực nghiệm BMRA2



Hình 3.12. Mô men BMRA2 ở trạng thái tắt



Hình 3.13. Kết quả mô men đầu ra

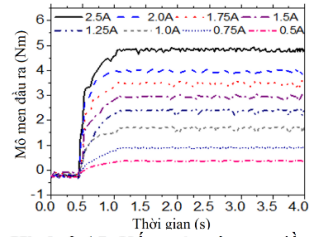


Hình 3.14. Mô men và dòng điện

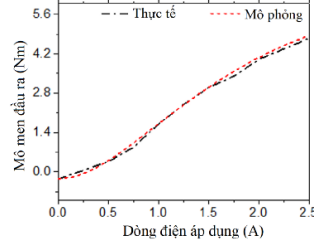
1,05 s. Do đó, thời gian đáp ứng của mô men cảm ứng đầu ra là khoảng 0,55 s, thời gian đáp ứng cơ học là 30 ms.

Tiến hành tương tự cho đĩa 2 ta có các kết quả biểu diễn bởi các Hình 3.15, Hình 3.16. Thời gian đáp ứng của dòng điện áp dụng khoảng 0,2 s. Mô men xoắn đầu ra trung bình ở dòng điện 2,5 A đạt 4,7 Nm nhỏ hơn một chút so với trong trường hợp đĩa 1, mô men xoắn khoảng -0,25 Nm ở trạng thái tắt. Mô men đầu ra đo được và mô phỏng so với dòng điện được thể hiện ở Hình 3.16 phù hợp với mô men mô phỏng và sai số nhỏ hơn 5%. Với kết quả từ Hình 3.14 và Hình 3.16 thì mô men xoắn đầu ra đo được hai chiều của BMRA được mô tả bởi Hình 3.17. Kết quả cho thấy mô men xoắn đầu ra hai chiều của BMRA có thể được điều khiển bởi dòng điện áp dụng cho các cuộn dây. Cụ thể, nếu mô men xoắn đầu ra nhỏ hơn -0,22 Nm thì dòng điện được cấp cho các cuộn dây của đĩa 1 và ngược lại nếu mô men xoắn đầu ra lớn hơn -0,22 Nm thì dòng điện được đặt vào các cuộn dây của đĩa 2. Từ Hình 3.18 nếu áp dụng dòng điện 0,2 A cho các cuộn dây của đĩa 2 thì loại bỏ được mô men xoắn trạng thái nghỉ của BMRA2, khi đó mô men xoắn đầu ra bằng không có thể đạt được. Tuy nhiên, sai số đo nhiễu khoảng +/-0,09 Nm.

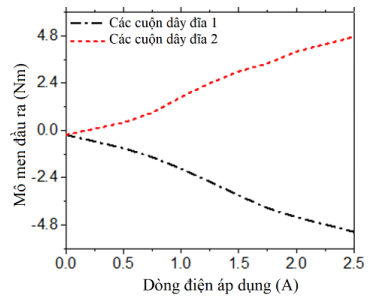
Lỗi do nhiễu này đến từ thiết bị đo và cũng có thể do dòng điện đặt vào cuộn dây không ổn định. Kết quả thử nghiệm cho thấy sai số mô phỏng nhỏ hơn 5%. Thời



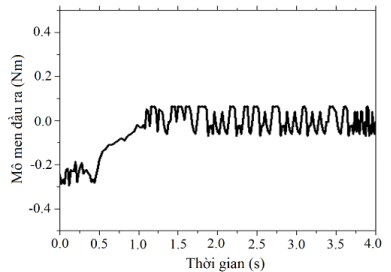
Hình 3.15. Kết quả mô men đầu ra



Hình 3.16. Mô men và dòng điện



Hình 3.17. Kết quả mô men đầu ra BMRA2



Hình 3.18. Mô men xoắn đầu ra bằng không

gian đáp ứng của mô men xoắn đầu ra là khoảng 55 ms (trong đó trễ cơ học là 30 ms) với mức này đáp ứng được cho các hệ thống phản hồi lực trong thực tế.

Chương 4. PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG JOYSTICK 3D PHẢN HỒI LỰC DÙNG MRF

4.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ 3D.

Trên cơ sở mô hình [36] tác giả phát triển hệ thống joystick 3D phản hồi lực (Hình 4.1) có các đặc điểm như sau:

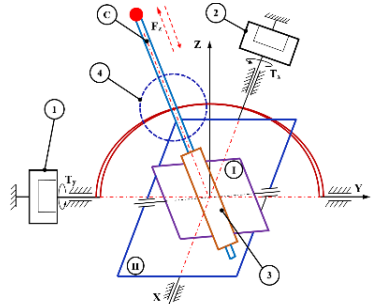
- Về thiết kế: bố trí hai BMRA trên hai trục X và trục Y (biểu diễn mô men T_x , T_y), bố trí LMRB trên trục Z (biểu diễn lực F_b).
- Về phân tích: phân tích phản hồi lực 3D của hệ được thực hiện.
- Về điều khiển: xây dựng các bộ điều khiển cho hệ thống qua đó đánh giá lực phản hồi của hệ thống

Hệ thống hoạt động như sau: trục đầu ra của hai BMRA được kết nối với hai trục của cơ cấu gimbal (4), cơ cấu gimbal thông qua tay cầm (C) được tích hợp với LMRB (3), trong khi vỏ LMRB được kết nối với thân trục Y của cơ cấu gimbal thông qua chốt xoay và xoay dọc theo khe trục Y (mặt phẳng I). Tay cầm được đặt trong khe trục X của cơ cấu gimbal và di chuyển dọc theo (mặt phẳng II), góc hoạt động của cần từ -60^0 đến $+60^0$

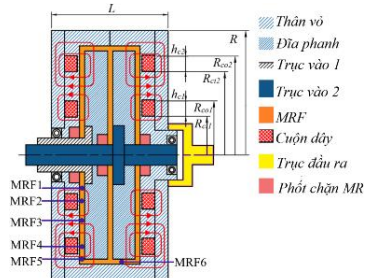
4.2 Tính toán mô men/lực BMRA, LMRB.

4.2.1 Tính toán mô men BMRA.

Trên cơ sở BMRA2 đã nghiên cứu ở Chương 3 [37], tác giả chọn BMRA (Hình 4.2). Việc tính mô men đầu ra của BMRA tương tự như BMRA2.



Hình 4.1. Sơ đồ động học hệ 3D phản hồi lực



Hình 4.2. Cấu hình của BMRA

4.2.2 Tính toán lực hãm LMRB.

Cấu tạo của LMRB (Hình 4.3). Nguyên lý hoạt động LMRB: trục phanh sẽ được trượt trên hai bạc trượt ở hai đầu, khe hở giữa trục và thân LMRB sẽ được điền đầy MRF, trên thân LMRB bố trí hai cuộn dây. Để ngăn không cho MRF rò rỉ thì có bố trí hai O-ring ở hai đầu của LMRB. Lực hãm của LMRB được tính theo công thức (2-10):

$$F_{sd} = \frac{2\pi \cdot \mu \cdot R_{st} \cdot L \cdot u}{t_g} + 2(\pi R_{st} L \tau_y + F_{or}) \quad (4-1)$$

$$\text{Lực ma sát giữa trục và vòng chắn: } F_{or} = f_c L_o + f_h A_r \quad (4-2)$$

4.3 Tính toán tối ưu hóa cho BMRA và LMRB.

4.3.1 Tối ưu hóa BMRA.

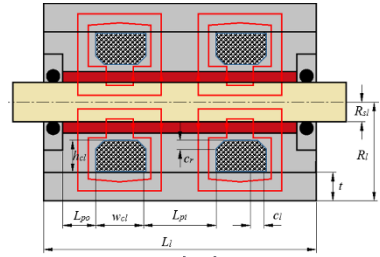
$$\text{Hàm mục tiêu: } V_{BMRA} = \pi R^2 \cdot L \quad (\text{với ràng buộc: } T_b \geq T_{br}) \quad (4-3)$$

R là bán kính ngoài BMRA; L là chiều rộng hiệu dụng của BMRA; T_{br} là mô men đầu ra yêu cầu và được xác định từ lực phản hồi mong muốn theo mỗi hướng:

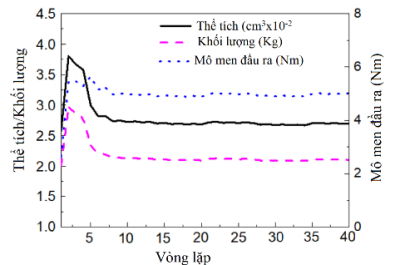
$$T_{br} = l_{max} F_{max} \quad (4-4)$$

Với F_{max} là lực phản hồi tối đa mong muốn mỗi hướng được chọn bằng 20 N; l_{max} là chiều dài tối đa của cần điều khiển là 200 mm. Mô men đầu ra yêu cầu tối đa có thể được tính là 4 Nm, mô men đầu ra tối đa yêu cầu của BMRA được thiết lập bằng 5 Nm để bù cho mô hình thiếu chính xác và tổn thất năng lượng.

Các biến thiết kế của BMRA như chiều cao các cuộn dây (h_{c1} , h_{c2}); chiều rộng cuộn dây (w_c); bán kính ngoài và trong của đĩa (R_{do} , R_{di}); bán kính trong cuộn dây 1 và 2 (R_{ci1} , R_{ci2}); độ dày của đĩa (t_d); độ dày của vỏ hình trụ (t_0); độ dày phần bên ngoài vỏ bên (t_h), ngoài ra $t_g = 0,8$ mm và $t_w = 0,6$ mm được chọn theo kinh nghiệm.



Hình 4.3. Kết cấu LMRB



Hình 4.4. Khối lượng - Mô men BMRA

Việc tối ưu hoá BMRA của hệ thống joystick 3D tương tự như tối ưu hoá của BMRA2 đã trình bày ở Chương 3. Kết quả tối ưu được trình bày bởi Hình 4.4 cho thấy khi mô men đầu ra tối đa bị ràng buộc $T_{br} \geq 5$ Nm với độ chính xác 2%.

Bảng 4.1. Kết quả tối ưu của các BMRA.

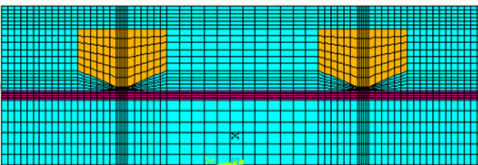
Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{c1} = w_{c2} = 4,25; h_{c1} = 7,4; h_{c2} = 6,2; R_{ci1} = 29$ $R_{ci2} = 47,5; R_i = 20; R_o = 56,6; t_d = 4; R = 59,4$ $t_h = 3,2; L = 24,3; t_w = 0,6; t_g = 0,8$	$T_{max} = 4,99$ Nm; $P_w = 24$ W $V = 269$ cm ³ ; $m_b = 2,05$ kg $R_{c1} = 1,68$ Ω; $R_{c2} = 2,16$ Ω

4.3.2 Tối ưu hóa LMRB.

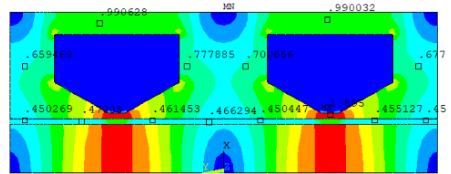
Từ các vấn đề trên thì việc tìm các giá trị tối ưu các kích thước chủ yếu của LMRB sao cho có lực trạng thái ban đầu giảm đến thấp nhất có thể và được xác định bởi công thức sau: $F_{d0} = \frac{2\pi\mu_0 R_{st} L_d u}{t_g} + 2(\pi R_{st} L_d \tau_{y0} + F_{or})$

Với ràng buộc $F_b \geq F_{br}$, và $R_l \leq 30$ mm.

Các thông số chiều cao (h_{cl}), chiều rộng (w_{cl}), góc vát (c_r, c_l); chiều dài lõi (L_{po}, L_{pi}), bán kính trục (R_{st}) và độ dày vỏ (t_h) đều được chọn làm biến thiết kế khi tối ưu hóa LMRB. Tương tự cho giải pháp tối ưu cho LMRB với lực phanh tối đa 25 N, với kích thước khe MRF bằng 0,6 mm, độ dày thành mỏng lấy 0,5 mm. Mô hình phần tử hữu hạn sử dụng là phần tử cặp đối xứng trục (PLANE 13) của phần mềm ANSYS áp dụng cho LMRB được hiển thị trong Hình 4.5. Phân bố mật độ từ tính của LMRB thể hiện trong Hình 4.6. Kết quả tối ưu (Hình 4.7), ta thấy rằng hội tụ xảy ra sau vòng lặp thứ 39, tại đó lực trạng thái ban đầu là 4,95 N, lực hãm tối đa là 24,94 N gần bằng với lực cần thiết với bán kính $R = 14,8$ mm nhỏ hơn giá trị ràng buộc.



Hình 4.5. Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB



Hình 4.6. Phân bố từ thông ở mức tối ưu LMRB

Bảng 4.2. Kết quả tối ưu của LMRB.

Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{cl}=11,3; h_{cl}=7,4; t_g=0,5$	$F_{tinh} = 4,95 \text{ N};$
$c_l = 4,85; c_r = 2,85; L_{pi} = 8$	$F_{max} = 24,94 \text{ N}$
$R=14,8; L_{po}=4,0; L_l = 38,7$	$m_b = 0,2 \text{ kg}; P_w=4,5 \text{ W}$
$t_w = 0,5; t_o = 2,1; R_{sl} = 4,5;$	$R = 2,3 \Omega$

4.4 Phân tích lực hệ phản hồi lực 3D.

Sơ đồ động học của cần điều khiển của hệ phản hồi lực biểu diễn bởi **Hình 4.8**. Tại vị trí bất kỳ của núm tay cầm ở vị trí P (x_p, y_p, z_p) với trục Z có chiều dài l , ta xoay cần một góc ϕ_x theo trục X và ϕ_y theo trục Y thì vị trí của điểm hoạt động P xác định bởi:

$$r_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = R_{XY} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lc(\phi_x)s(\phi_y) \\ -ls(\phi_x) \\ lc(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

Với R_X và R_Y là ma trận xoay trục X và Y.

$$R_{XY} = \begin{bmatrix} c(\phi_y) & s(\phi_x)s(\phi_y) & c(\phi_x)s(\phi_y) \\ 0 & c(\phi_x) & -s(\phi_x) \\ -s(\phi_y) & c(\phi_y)s(\phi_x) & c(\phi_x)c(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (s: \sin; c: \cos) \quad (4-6)$$

Với vị trí của núm điều khiển tùy ý thì mô men và lực đầu ra được xác định bởi:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ F_b \end{bmatrix} = -J_{XY}^T R \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{z2} \end{bmatrix}; \quad J_{XY} = \begin{bmatrix} 0 & z_p & x_p/l \\ -z_p & 0 & y_p/l \\ y_p & -x_p & z_p/l \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

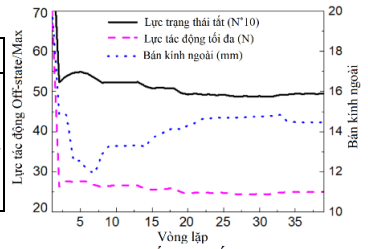
$F_b = -F_{z2}$; T_x, T_y là hai hàm của F_{x2} và F_{y2}

4.5 Thiết kế, chế tạo hệ phản hồi lực 3D.

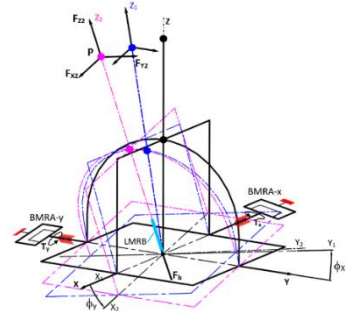
Khi có các thông số tối ưu của BMRA và LMRB, tác giả tiến hành chế tạo, lắp ráp và hoàn thành hệ thống thí nghiệm của hệ joystick 3D phản hồi lực được biểu diễn bởi Hình 4.9

4.6 Kết quả thực nghiệm.

Mô hình thực nghiệm cần điều khiển phản hồi lực 3D (Hình 4.10). Kết quả từ Hình 4.11 có thể tính giá trị ổn định trung bình của các mô men đầu ra trạng thái



Hình 4.7. Kết quả tối ưu LMRB



Hình 4.8. Sơ đồ động học cần điều khiển

ban đầu tương ứng là $-0,218 \text{ Nm}$ và $-0,215 \text{ Nm}$. Giá trị âm có nghĩa là mô men đầu ra nằm cùng hướng với trục 1 của BMRA.

Từ kết quả thử nghiệm mô men đầu ra của BMRA_x như là một hàm của dòng điện, tác giả áp dụng đường cong xấp xỉ bậc 3 tính được dòng điện áp dụng cho cuộn dây của BMRA_x với mô men xoắn đầu ra với công thức (4-8), (4-9) và kết quả được thể hiện bởi Hình 4.12

$$I_x = -(0,1914 + 0,9367T_x + 0,2157T_x^2 + 0,0261T_x^3) \quad (T_x \leq -0,218 \text{ Nm}) \quad (4-8)$$

$$I_x = 0,1921 + 0,72153T_x - 0,18035T_x^2 + 0,02778T_x^3 \quad (T_x > -0,218 \text{ Nm}) \quad (4-9)$$

Đối với trục Y cũng được thể diễn qua Hình 4.13 bởi công thức (4-9), (4-10)

$$I_y = -(0,1927 + 0,9302T_y + 0,2115T_y^2 + 0,0252T_y^3) \quad (T_y \leq -0,22 \text{ Nm}) \quad (4-10)$$

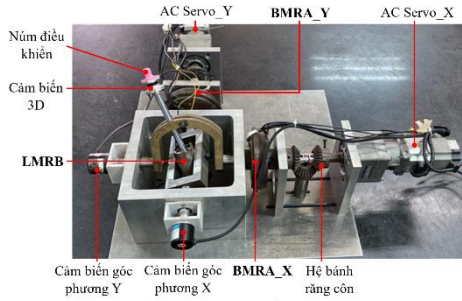
$$I_y = 0,1958 + 0,72954T_y - 0,18798T_y^2 + 0,0261T_y^3 \quad (T_y > -0,22 \text{ Nm}) \quad (4-11)$$

Độ lớn của lực LMRB được tính bằng giá trị trung bình độ lớn của lực vào/ra. Kết quả tại $I = 2,5 \text{ A}$ thì lực đo được là $25,3 \text{ N}$, trong khi lực mô phỏng là $24,98 \text{ N}$.

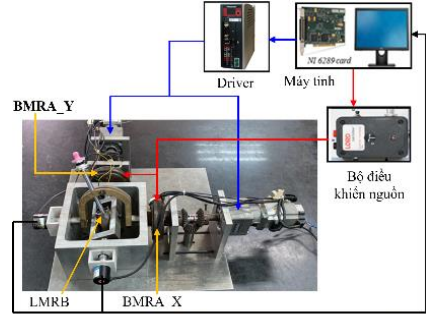
Lực ngoài trạng thái là $5,35 \text{ N}$ trong khi lực mô phỏng là $4,95 \text{ N}$. Tại $I = 2,0 \text{ A}$ đặt vào thì độ lớn của lực tác động là $23,0 \text{ N}$ lớn hơn lực cực đại cần thiết. Sử dụng đường cong xấp xỉ bậc 3 thì ta có (Hình 4.14):

$$I_b = -0,99805 + 0,24302|F_b| - 0,01246|F_b|^2 + 0,000329|F_b|^3, \quad (|F_b| > 5,35 \text{ N}) \quad (4-12)$$

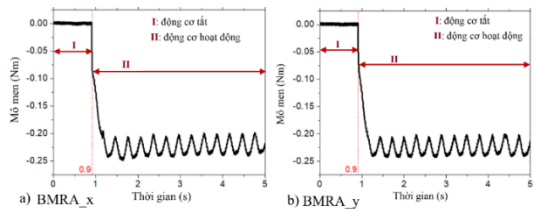
$$I_b = 0 \text{ khi } |F_b| < 5,35 \text{ N}$$



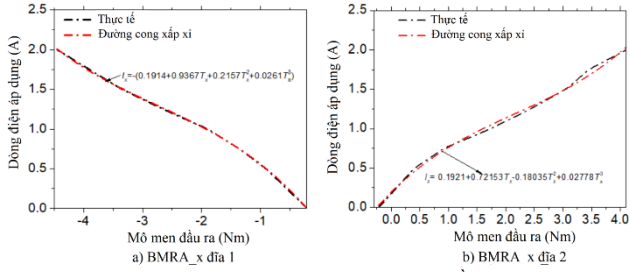
Hình 4.9. Mô hình thực tế hệ joystick 3D



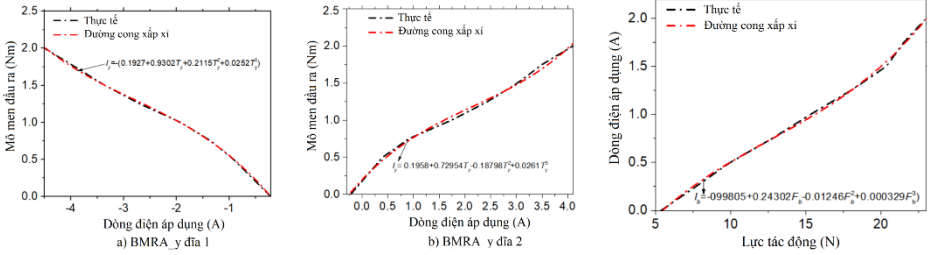
Hình 4.10. Mô hình thực nghiệm hệ joystick 3D



Hình 4.11. Mô men đầu ra BMRA trạng thái đầu



Hình 4.12. Dòng điện như hàm mô men đầu ra BMRA_x



Hình 4.13. Dòng điện như hàm mô men đầu ra BMRA_y **Hình 4.14.** Dòng điện và lực LMRB

4.7 Điều khiển phản hồi lực cho hệ joystick 3D.

4.7.1 Thiết kế bộ điều khiển vòng hở cho hệ phản hồi lực 3D.

Để điều khiển lực phản hồi tiếp tuyến mong muốn đến tay người vận hành thì tác giả tiến hành xây dựng các bộ điều khiển vòng hở (Hình 4.15) và để ghi nhận lực phản hồi tiếp tuyến cần thiết tại một vị trí bất kỳ của cần. Vị trí góc của các trục cần điều khiển được đo bằng bộ mã hóa góc, trong khi chiều dài của cần điều khiển đo bằng bộ đo tuyến tính. Vị trí của nùm thao tác được xác định bởi:

$$\mathbf{r}_p = [x_p, y_p, z_p]^T = R[0, 0, l]^T \quad (4-13)$$

Trong đó R là tổng ma trận xoay của cần với hệ tọa độ toàn cục. Chú ý thời gian lấy mẫu là $\Delta t = 0,01(s)$.

Khi đó ma trận R được viết lại như sau: $R(t + \Delta t) = R(\Delta t)R(t)$

Khi $R(\Delta t)$ có thể tính gần đúng như sau:

$$R(\Delta t) = R_{d\phi_x} R_{d\phi_y} = \begin{bmatrix} c(d\phi_y) & s(d\phi_x)s(d\phi_y) & c(d\phi_x)s(d\phi_y) \\ 0 & c(d\phi_x) & -s(d\phi_x) \\ -s(d\phi_y) & c(d\phi_y)s(d\phi_x) & c(d\phi_x)c(d\phi_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 9 & d\phi_y \\ 0 & 1 & -d\phi_x \\ -d\phi_y & d\phi_x & 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

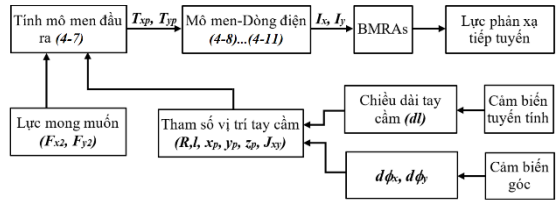
Lực phản hồi LMRB được đo riêng biệt (Hình 4.16). Từ đây ta thấy rằng lực pháp tuyến mong muốn (F_{z2}), lực hãm LMRB (F_b) được xác định bởi $F_b = F_{z2}$.

Kết quả của **Hình 4.17** biểu diễn các lực tiếp tuyến phản hồi đo được tương đối tốt so với các lực mong muốn. Tuy nhiên vẫn có độ trễ khoảng 30 ms so với giá trị mong muốn. Điều này chủ yếu là do có độ trễ cơ học của phản ứng mô men xoắn của các BMRA.

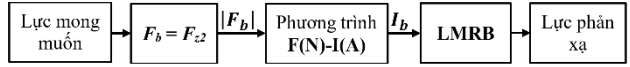
Bước thứ 2, từ vị trí ban đầu ($x_p = 0$, $y_p = 0$, $z_p = 200$ mm), một chuyển động tùy ý của tay cầm được thực hiện và lực từ người vận hành được đo bằng cảm biến lực 3D, kết quả được trình bày trong **Hình 4.18**. Với kết quả này thì ta cũng thấy độ trễ khoảng 30 ms giữa giá trị đo được với giá trị mong muốn. So với kết quả trong trường hợp tay cầm được cố định thì lực tiếp tuyến cao hơn một chút. Điều này do chuyển động không ổn định của tay cầm. Đối với lực pháp tuyến thì hệ thống không thể phản xạ lực có độ lớn nhỏ hơn 5,3 N do lực ma sát ngoài trạng thái đã nói bên trên. Bước nhảy từ giá trị của lực phản hồi về không là do sự thay đổi hướng của lực khi đo.

4.7.2 Thiết kế bộ điều khiển vòng kín cho hệ phản hồi lực 3D.

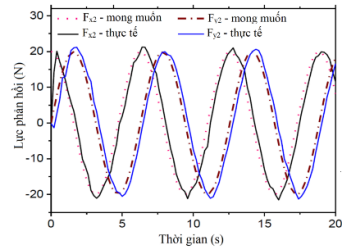
Từ kết quả mô men xoắn đầu ra được sử dụng để xác định mô hình toán bằng phần mềm MATLAB. Đáp ứng bước và kết quả nhận dạng hệ thống của BMRA



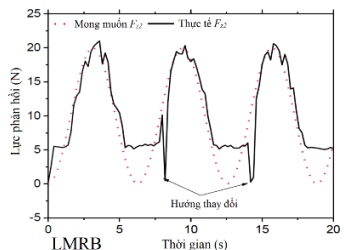
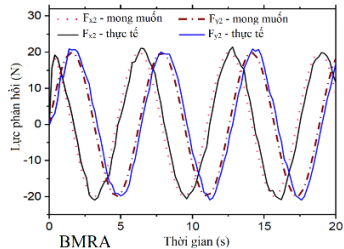
Hình 4.15. Lưu đồ điều khiển hở lực phản hồi tiếp tuyến



Hình 4.16. Lưu đồ điều khiển hở cho lực phản hồi thông thường



Hình 4.17. Kết quả của BMRA_x, BMRA_y



Hình 4.18. Kết quả thực nghiệm lực phản hồi

và LMRB được đưa bởi Hình 4.19. Điều này có thể thấy rằng mô men truyền động đo được rất gần với mô men truyền động từ mô hình nhận dạng.

▪ Đối với BMRA áp dụng như sau: $a\ddot{T} + b\dot{T} + T = f(I) = 2,105I$ (4-15)

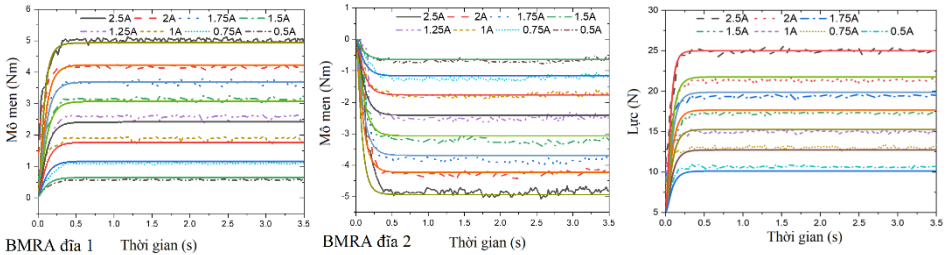
Với $a = 1/26590$; $b = 2452/26590$

$f(I) = 0,01025 - 0,53308 * I - 1,63852 * I^2 + 0,42608 * I^3$; (T là mô men mong muốn; I : dòng điện áp dụng)

▪ Đối với LMRB áp dụng như sau: $c\ddot{F} + d\dot{F} + F = g(I)$ (4-16)

Với $c = 1/649,5$; $d = 60,69/649,5$

$g(I) = 5,01899 + 9,75739 * I + 1,28363 * I^2 - 0,796 * I^3$; (F là lực mong muốn, I là dòng điện áp dụng).

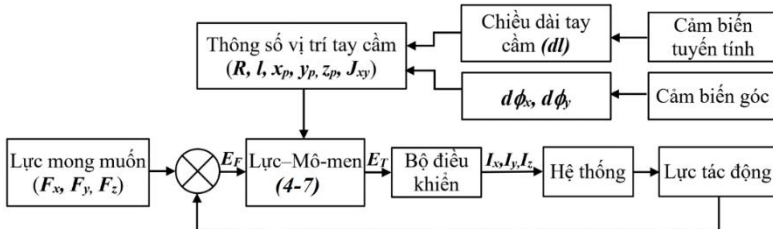


Hình 3.19. Đáp ứng bước của hệ thống

Cần lưu ý rằng lực phản hồi pháp tuyến luôn bằng lực tắt dần và tách khỏi lực tiếp tuyến. Do đó phương trình (4-7) có thể viết như sau:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} = -[J^T R]_{22} \begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix}; F_b = F_{z2} \quad (4-17)$$

Với $-[J^T R]_{22}$ là ma trận con 2x2 của ma trận chính $-[J^T R]$. Các thông số của cần điều khiển (r_p), ma trận J_{XY} , R , T_x , T_y , lực mong muốn F_{x2} , F_{y2} . Bộ điều khiển vòng kín để phản ánh lực phản hồi mong muốn trình bày bởi Hình 4.20



Hình 4.20. Lưu đồ điều khiển vòng kín của lực mong muốn

- Bộ điều khiển PID thì dòng điện được xác định như sau:

$$I(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) + k_D \dot{e}(t) \quad (4-18)$$

Ở đây k_p , k_i , và k_D lần lượt là giá trị tỷ lệ, tích phân đạo hàm; e là sai số giữa giá trị đầu vào và ra.

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển tác giả sử dụng ITAE (Integral of Time-Weighted Absolute Error) là tích phân sai lệch theo

$$\text{thời gian được xác định bởi: } ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (4-19)$$

Trong đó t là thời gian mô phỏng; $e(t)$ là sai lệch thời gian. Từ các giá trị tối ưu thực hiện trên MATLAB SIMULINK sao cho tiêu chuẩn ITAE nhỏ nhất.

Bảng 4.3. Kết quả điều chỉnh k_p , i , k_d

BMRA_x	$k_p = 10$	$k_i = 0$	$k_d = 8$
BMRA_y	$k_p = 9$	$k_i = 0$	$k_d = 7$
LMRB	$k_p = 9$	$k_i = 0$	$k_d = 2$

Qua giá trị của hệ số ta thấy khâu tích phân không hưởng đáng kể nên thực tế chỉ là bộ điều khiển PD. Kết quả (Hình 4.21) cho sai lệch của hệ thống là 8%.

- Bộ điều khiển SMC cho lực phản hồi [33]

Tổng quát ta có: $a\ddot{T} + b\dot{T} + T = u(I)$

$$\text{Đặt } T = x_1; x_2 = \dot{x}_1 = \dot{T}, \dot{x}_2 = \frac{u}{a} - \frac{x_1}{a} - \frac{bx_2}{a} + d \quad (4-20)$$

$[x_1 \ x_2]$ là vectơ trạng thái; u là điều khiển đầu vào; a, b là tham số xác định từ nhận dạng hệ thống, với $a = 1/26590$, $b = 2452/26590$.

d : gồm độ nhiễu và không chắc chắn của hệ thống, $|d| \leq D$

$$\text{Mặt trượt được xác định bởi: } s = ce + \dot{e} \quad (4-21)$$

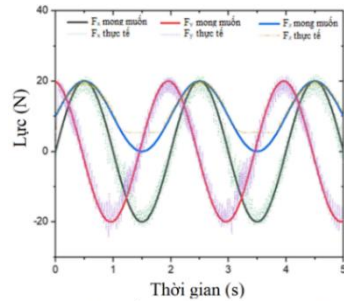
Trong đó e là sai số được xác định: $e = x_d - x$

x_d : giá trị mong muốn; x : giá trị đo được; c : hệ số độ dốc mặt trượt ($c > 0$)

Hàm điều khiển được định nghĩa như sau:

$$u = a \left[k \text{sign}(s) + c\dot{e} + \dot{x}_{2d} + \frac{x_1}{a} + \frac{bx_2}{a} \right] \quad (4-22)$$

Tính ổn định của hệ thống sử dụng hàm Lyapunov như sau: $V = \frac{1}{2}s^2$



Hình 4.21. Kết quả thực nghiệm theo PID

$$\dot{V} = s(-k\text{sign}(s) - d) = -k|s| - sd \quad (4-23)$$

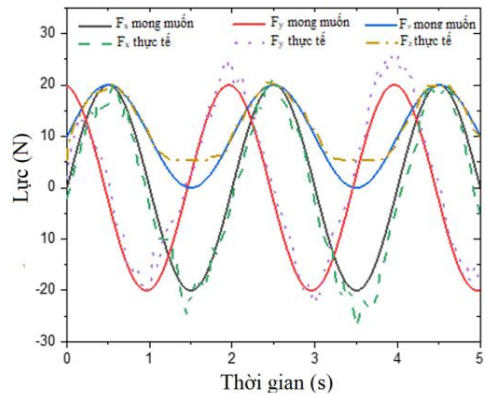
Khi $k \geq D$ thì $\dot{V} = -k|s| - sd \leq 0$ hệ thống ổn định.

Từ các giá trị tối ưu của bộ điều khiển được thực hiện trên MATLAB SIMULINK sao cho tiêu chuẩn ITAE nhỏ nhất.

Bảng 4.4. Kết quả điều chỉnh của c , k

BMRA_x	$c = 15$	$k = 14$
BMRA_y	$c = 14$	$k = 197$
LMRB	$c = 17$	$k = 10$

Kết quả thực nghiệm với sai lệch của hệ thống sử dụng SMC là 4%. Với kết quả được thể hiện ở Hình 4.21 và Hình 4.22 thì bộ điều khiển PID và SMC ở tần số 3Hz của hàm sin tương ứng. Đối với bộ SMC cho kết quả lực mong muốn tốt hơn với sai số nhỏ bằng 4%, nhỏ hơn bộ PID 8%. Lực theo dõi của PID dao động liên tục xung quanh lực mong muốn gây ra bởi sự liên tục của dòng điện của mỗi bộ truyền động. Điều này dễ hiểu là trong hệ thống có nhiều và cơ cấu không ổn định, PID không thể giải quyết tất cả các nhược điểm này. Tuy nhiên, dòng điện đầu vào của bộ điều khiển SMC mượt mà hơn bộ điều khiển PID. Bên cạnh đó, điều khiển lực của cơ cấu truyền động bằng SMC theo dõi tốt với lực mong muốn. Ngoài ra bộ SMC có thể hạn chế nhiễu, sự không chắc chắn và sự thay đổi của hệ thống. Trong cả hai bộ điều khiển, có thể thấy rằng lực thực tế F_z không thể theo dõi lực yêu cầu với lực nhỏ hơn 5,3 N.



Hình 4.22. Kết quả thực nghiệm theo SMC

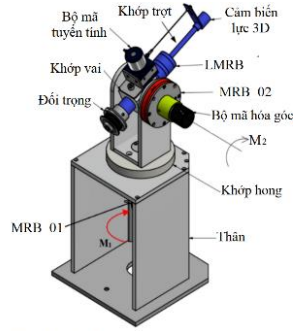
rằng lực thực tế F_z không thể theo dõi lực yêu cầu với lực nhỏ hơn 5,3 N.

Chương 5. PHÁT TRIỂN TAY MÁY 3D PHẢN HỒI LỰC

5.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.

Từ nhu cầu trong thực tế nhóm nghiên cứu đã phát triển một hệ thống tay máy phản hồi lực 3D (Hình 5.1).

Tay máy bao gồm khớp thắt lưng (khớp 01), khớp vai (khớp 02) và khớp trượt cánh tay (khớp 03). Trên trục của khớp 01 bố trí một MRB_01 dùng để phản xạ lực tiếp tuyến ngang mong muốn, đối với khớp 02 thì trên trục lắp MRB_02 để phản ánh lực tiếp tuyến với độ cao mong muốn còn trên khớp trượt cánh tay thì bố trí LMRB. Lực phản xạ tối đa theo mỗi hướng lấy bằng 40 N có xét tới khả năng của người vận hành, mô men của MRB là 8 Nm



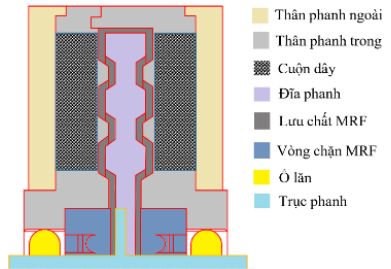
Hình 5.1. Cấu tạo tay máy

5.2 Thiết kế tay máy phản hồi lực 3D.

5.2.1 Thiết kế phanh biên dạng răng (MRB).

5.2.1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.

Kết cấu phanh có đĩa phanh hình răng như Hình 5.2. Mục đích tăng bề mặt tiếp xúc giữa MRF với đĩa phanh và vỏ phanh từ đó sẽ cho mô men lớn và khối lượng giảm đáng kể.



Hình 5.2. Cấu tạo MRB rãnh nghiêng

5.2.1.2 Tính toán mô men MRB.

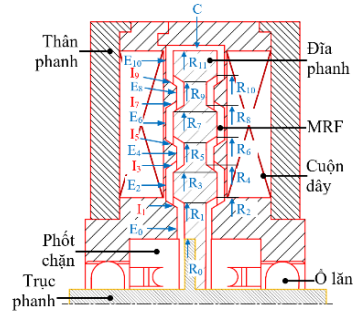
Theo như cách tính mô men trên rãnh nghiêng đã trình bày ở Chương 2 thì với MRB đề xuất như Hình 5.3. Khi đó mô men MRB được tính:

$$T_b = 2(T_{E0} + T_{E2} + T_{E4} + T_{E6} + T_{E8} + T_{E10}) + 2(T_{I1} + T_{I3} + T_{I5} + T_{I7} + T_{I9}) + T_c + 2T_s \quad (5-1)$$

Thành phần mô men T_{Ei} , T_{Ii} và T_c của phanh được xác định như sau:

$$T_{Ei} = \frac{\pi \mu_{Ei} R_{i+1}^4}{2d} \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^4 \right] \Omega + \frac{2\pi \tau_{yi} E_i}{3} (R_{i+1}^3 - R_i^3), \quad (i = 0, 2, 4, 6, 8, 10) \quad (5-2)$$

$$T_{Ii} = 2\pi \left(R_i^2 l + R_i l^2 \sin \phi + \frac{1}{3} l^3 \sin^2 \phi \right) \tau_{yIi} + \frac{1}{2} \pi \mu_{Ii} \frac{\pi}{d} (4R_i^3 + 6R_i^2 l \sin \phi + 4R_i l^2 \sin^2 \phi + l^3 \sin^3 \phi); \quad (1, 3, 5, 7, 9) \quad (5-3)$$



Hình 5.3. Sơ đồ tính mô men BMR

$$T_c = 2\pi R_{11}^2(b + 2h)(\tau_{yc} + \mu_c \frac{\Omega R_{11}}{d}) \quad (5-4)$$

Với R_i là bán kính của điểm thứ i ; l là chiều dài của khe nghiêng, ϕ là góc nghiêng, h là chiều cao của răng.

Mô men ma sát do phớt sinh ra được tính theo (2-11): $T_s = 0.65(2R_s)^2 \omega^{1/3}$

5.2.2 Thiết kế LMRB.

Đối với hệ thống tay máy như trên yêu cầu thiết kế LMRB thì trong Chương 4 [38] đã trình bày và chế tạo thực nghiệm một mẫu kết quả khá tốt, tác giả không nhắc lại mà chỉ chọn lại lực hãm mới là $F = 40$ N.

5.3. Tối ưu hóa phanh cho tay máy 3D.

5.3.1 Tối ưu hoá MRB.

Khối lượng nhỏ nhất của phanh:

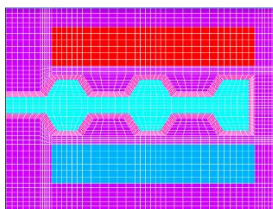
$$m_b = V_d \rho_d + V_h \rho_h + V_s \rho_s + V_{MR} \rho_{MR} + V_c \rho_c \quad (5-5)$$

Với điều kiện: $T_b \geq T_{br}$; giới hạn biến thiết kế: $x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$, ($i = 1, 2, \dots, n$)

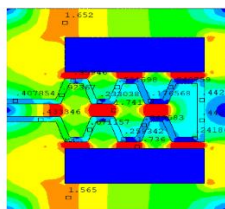
Trong đó V_d , V_h , V_s , V_{MR} và V_c tương ứng là thể tích của đĩa, thân vỏ, trục, MRF và cuộn dây của phanh; ρ_d , ρ_h , ρ_s , ρ_{MR} và ρ_c lần lượt là khối lượng riêng của đĩa, vỏ, trục, MRF và cuộn dây; x_i^L và x_i^U là giới hạn dưới và trên của biến thiết kế hình học tương ứng x_i của phanh MRF; n là số lượng biến thiết kế; T_{br} là mô men xoắn cần thiết của phanh.

Các tham số kích thước quan trọng của MRB như là chiều cao, chiều rộng của cuộn dây (h_c , w_c), bán kính ngoài đĩa R_o , bán kính răng trong R_i , kích thước hình học của răng (chiều cao đỉnh, bề dày đỉnh, bề dày đáy), bề dày đĩa t_d ... đều được chọn làm biến thiết kế, còn thông số khác $t_g = 0,6$ mm, $t_w = 1$ mm được chọn từ ban đầu. Trong quá trình tối ưu hóa dòng điện $I = 2,5$ A được tính vì có xem xét tới các điều kiện làm việc an toàn, tỷ lệ lấp đầy của cuộn dây lấy 70%, tổn thất từ tính được giả định là 10%, mô men giới hạn là 10 Nm nhưng yêu cầu chỉ 8 Nm, tốc độ hội tụ được lấy 0,1%

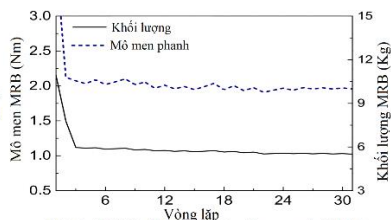
Mô hình PTHH phân tích mạch từ, mật độ phân bố từ của MRB rất đồng đều được thể hiện trong Hình 5.5. Kết quả tối ưu thể hiện **Bảng 5.1**



Hình 5.4. Mô hình PTHH của MRB



Hình 5.5. Phân bố mật độ từ thông



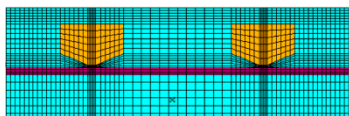
Hình 5.6. Khối lượng và mô men của MRB

Bảng 5.1. Kết quả tối ưu của MRB.

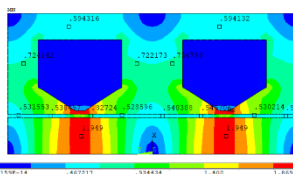
Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_c = 5,52; h_c = 15,8; R = 34,5; L = 35,8$	$T_{bmax} = 10 \text{ Nm}; m = 1,03 \text{ kg}$
$t_h = 4,6; t_w = 1,0; R_i = 10; R_d = 31,2$	$T_{tinh} = 0,1 \text{ Nm};$
$R_s = 6,0; t_d = 2,0; h = 2,6; t_{w1} = 3,2; t_{w2} = 4,6$	$P_w = 37 \text{ W}; R_c = 2,9 \Omega$

5.3.2 Tối ưu hoá LMRB.

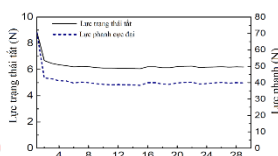
Trong đó một số thông số tính toán cần thay đổi cho phù hợp đó là $t_g = 0,8\text{mm}$, $t_w = 0,5 \text{ mm}$ Tương tự như thiết kế tối ưu đã được trình bày ở các phần trên thì mô hình phân tử hữu hạn và phân bố từ thông của LMRB được thể hiện ở Hình 5.7, Hình 5.8 và kết quả tối ưu với lực hãm yêu cầu lớn nhất là 40 N đạt được thể hiện bởi Hình 5.9



Hình 5.7. Mô hình PTHH phân tích mạch từ LMRB



Hình 5.8. Phân bố mật độ từ thông của LMRB



Hình 5.9. Lực hãm của LMRB

Bảng 5.2. Kết quả tối ưu LMRB.

Thông số thiết kế (mm)	Đặc tính hoạt động
$w_{cl} = 1,5; h_{cl} = 11,3; ch_1 = 3,7; ch_2 = 5$	$F_{max} = 40 \text{ N}; m = 0,46 \text{ kg}$
$R = 21,8; L = 39,2; t_w = 0,5; R_{sl} = 5;$	$F_t = 6,0\text{N}; P_w = 11,5 \text{ W}; R_c = 2,5 \Omega$

5.4 Thiết kế, chế tạo hệ thống phản hồi lực 3D.

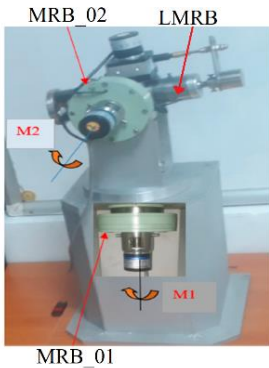
5.4.1 Thiết kế MRB, LMRB.

Sau khi có các thông số hình học tối ưu tác giả đi thiết kế MRB, LMRB cũng như hoàn thành hệ thống tay máy phản hồi lực đề ra.

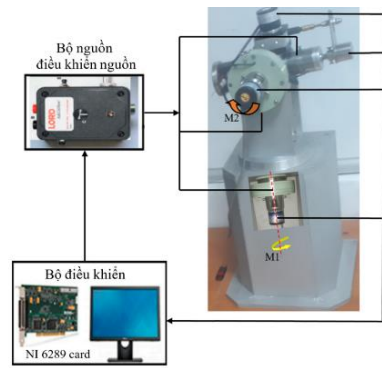
5.4.2 Hoàn thiện mô hình tay máy.(Hình 5.10)

5.5 Kết quả mô men của MRB và lực LMRB.

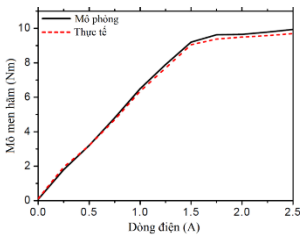
Hệ thống thực nghiệm (Hình 5.11). Trong quá trình thực nghiệm, cánh tay được xoay quanh khớp 01 và giá trị trung bình của lực tại các giá trị khác nhau của dòng điện được đưa vào đã được ghi lại. Các giá trị mô men của các MRB, LMRB cho bởi các Hình 5.12, Hình 5.13, Hình 5.14. Qua các kết ta thấy mô men từng trục của tất cả các phanh đáp ứng khá tốt, tuy nhiên vẫn có một số thời điểm việc đáp ứng chưa tốt lắm có thể do mất ổn định của hệ thống hay thao tác vận hành chưa ổn định.



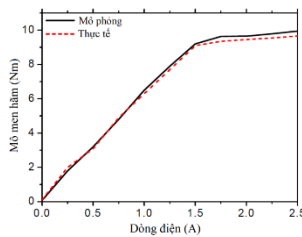
Hình 5.10. Mô hình thực tế tay máy



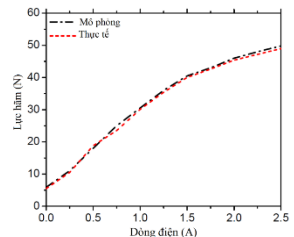
Hình 5.11. Mô hình thực nghiệm tay máy 3D



Hình 5.12. Mô men của MRB_01



Hình 5.13. Mô men của MRB_02



Hình 5.14. Lực hãm của LMRB

5.6 Thiết kế bộ điều khiển cho tay máy 3D phản hồi lực.

Để phản ánh các lực mong muốn thì bộ điều khiển vòng hở sẽ phản ánh lực tiếp tuyến mong muốn (Hình 5.15) và lực thông thường (Hình 5.16).

Từ các thông tin của các bộ mã hóa các giá trị của góc θ , bán kính cánh tay r được xác định, mô men xoắn của MRB_01 (T_w), MRB_02 (T_{sh}) tính theo công thức (5-6), (5-7):

$$T_w = F_h \cdot r \cdot \cos\theta \quad (5-6)$$

$$T_{sh} = F_e \cdot r \quad (5-7)$$

F_h và F_e là lực tiếp tuyến mong muốn của khớp 01 và 02.

Từ kết quả thử nghiệm trong Hình 5.12, Hình 5.13 ta có thể thấy rằng mô men phanh của các MRB gần như bão hòa khi áp dụng dòng điện $I > 1,5$ A. Áp dụng đường cong xấp xỉ bậc 2 thì dòng điện áp dụng cho các cuộn dây của MRB_01 (I_w) và MRB_02 (I_{sh}) được tính theo công thức tương ứng (5-8) và (5-9):

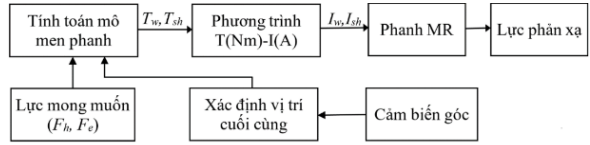
$$I_w = -0,0245 + 0,1516T_w + 0,00177T_w^2 \quad (5-8)$$

$$I_{sh} = -0,027 + 0,1543T_{sh} + 0,00155T_{sh}^2 \quad (5-9)$$

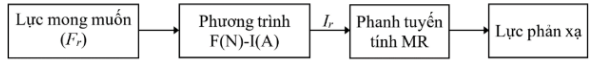
Tương tự như các MRB ta áp dụng dòng điện $I < 1,5$ A cho LMRB. Sử dụng đường cong xấp xỉ bậc 2 thì dòng điện áp dụng cho cuộn dây của LMRB được xác định theo phương trình (5-10)

$$I_r = -0,1707 + 0,03424F_r + 0,000169F_r^2 \quad (5-10)$$

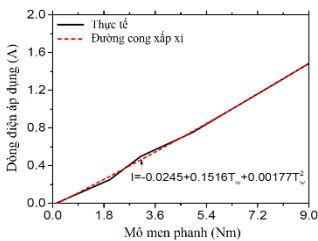
Sử dụng dòng điện $I < 1,5$ A và áp dụng như là một hàm của mô men được tạo ra thể hiện trong Hình 5.17, Hình 5.18, Hình 5.19



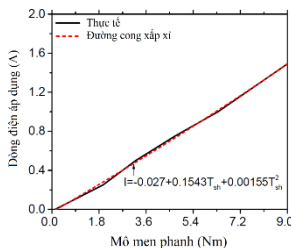
Hình 5.15. Lưu đồ điều khiển lực tiếp tuyến



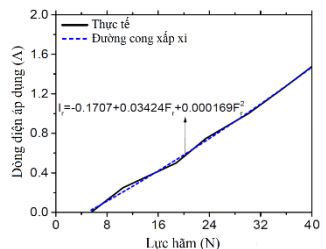
Hình 5.16. Lưu đồ điều khiển lực LMRB



Hình 5.17. Quan hệ T-I của MRB_01



Hình 5.18. Quan hệ T-I của MRB_02

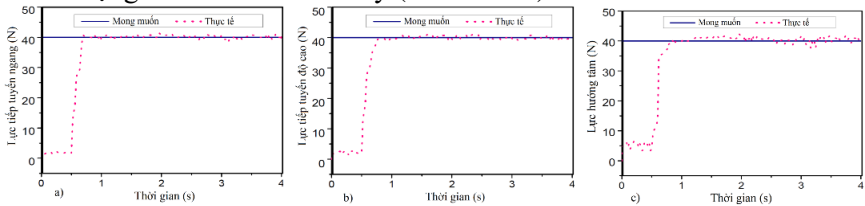


Hình 5.19. Quan hệ F-I của LMRB

5.6 Kết quả thực nghiệm.

Cần lưu ý rằng tín hiệu điều khiển điện áp nằm trong khoảng từ 0 - 5 V, dòng điện đầu ra thay đổi từ 0 - 2 A, tốc độ mẫu được đặt là 0,01 s. Kết quả Hình 5.20 cho thấy lực phản hồi mong muốn không đổi 40 N được đặt cho từng giai thành phần của lực phản hồi tại thời điểm 0,5 s.

Đối với lực ngang phản hồi thực tế so với mong muốn với sai số tối đa 4% và thời gian đáp ứng khoảng 0,24 s (Hình 5.20a). Lực nâng phản hồi thực tế so với mong muốn phản ánh tốt, thời gian đáp ứng là khoảng 0,26 s (Hình 5.20b). Lực hướng tâm phản hồi thực so với mong muốn với sai số tối đa khoảng 6,5% và có nhiều dao động hơn so với trước đây (Hình 5.20c).

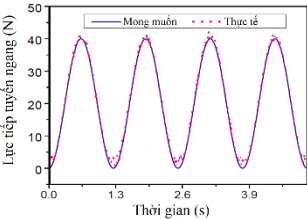


Hình 5.20. Kết quả thực nghiệm tay máy phản hồi lực

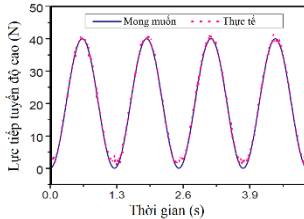
Kết quả lực phản hồi mong muốn hình sin cho các thành phần lực phản hồi được thể hiện ở các Hình 5.21, Hình 5.22, Hình 5.23. Tuy các lực phản hồi khá tốt nhưng không thể lực phản hồi nhỏ hơn 1,5 N đối với MRB_01. Ở trạng thái ổn định sai số tối đa của lực tiếp tuyến ngang và độ cao là khoảng 4%, lực hướng tâm lên đến 6,5% với nhiều biến động. Tuy nhiên, do mô men xoắn ban đầu của MRB và lực của LMRB của hệ thống hơi lớn nên không thể phản xạ lực nhỏ đến người điều khiển đó là 1,5 N cho vị trí ngang (khớp 01), 1,8 N cho lực nâng (khớp 02) và 6 N cho lực hướng tâm MRB_02 và 6 N với LMRB không thể nhỏ hơn 6 N, sai số tối đa của lực tiếp tuyến ngang và độ cao khoảng 4%, lực hướng tâm lên đến 6,5%.

Qua kết quả thực nghiệm cho thấy rằng bộ điều khiển hình cầu 3D dựa trên MRF được đề xuất có thể cung cấp lực phản hồi 3D mong muốn cho người vận hành. Cần lưu ý rằng bộ điều khiển đề xuất có thể dễ dàng tích hợp với bất kỳ robot bị động nào cho hệ thống điều khiển từ xa, trong đó kết hợp phản hồi lực

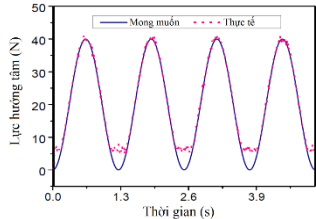
song song với điều khiển vị trí của hệ thống được đề xuất như trên. Điều này dẫn đến một ứng dụng tiềm năng cho các ứng dụng điều khiển từ xa.



Hình 5.21. Kết quả đo của MRB_01



Hình 5.22. Kết quả đo của MRB_02



Hình 5.23. Kết quả đo của LMRB

Chương 6. KẾT LUẬN

6.1 Kết luận.

Tóm lại trong nghiên cứu này, tập trung nghiên cứu thiết kế, mô phỏng, chế tạo và thực nghiệm trên các mô hình mới đồng thời thiết kế các bộ điều khiển PID, SMC cho việc điều khiển lực phản hồi của BMRA, MRB, LMRB áp dụng trong hệ thống phản hồi lực với nội dung tối ưu hóa (First Order, NSGA-II) thông số hình học của cơ cấu và xem xét các đặt tính cũng như khả năng đáp ứng của chúng trong các chức năng chính mà một hệ phản hồi lực cần có (khối lượng, mô men phát sinh). Qua các kết quả ban đầu đạt được thì ta thấy rất nhiều nội dung được nghiên cứu mới được đưa ra thông qua các nội dung được đăng trên các tạp chí quốc tế uy tín. Đề tài đã đưa ra một hướng mới về khả năng ứng dụng của MRF cho hệ thống phản hồi lực nói c và hệ thống haptic nói riêng. Tuy nhiên vẫn còn một số vấn đề cần được nghiên cứu thêm đó là hiệu suất của cơ cấu hiện tại chỉ đạt trên dưới 90%, do nhiều nguyên nhân đó là công nghệ chế tạo, lắp ráp, tính đồng chất của vật liệu.

6.2 Kiến nghị và hướng phát triển của đề tài.

- Hạn chế của đề tài:
 - Lực ma sát ban đầu của LMRB còn cao;
 - Hệ thống phản hồi chỉ mới phát triển tới 3D;
 - Bộ điều khiển phản hồi lực tính mới chưa cao.

-
- Hướng phát triển đề tài:
 - Phát triển cơ cấu LMRB mới giảm lực không tác động ban đầu;
 - Phát triển hệ thống joystick 3D dùng 03 cơ cấu tác động quay được điều khiển bởi chỉ một động cơ;
 - Xây dựng hệ thống điều khiển kín và áp dụng các thuật toán điều khiển hiện đại nhằm nâng cao chất lượng lực phản hồi;

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rabinow J. The magnetic fluid clutch. *AIEE Trans.* 67, 1308–1315, 1948.
- [2] Kordonski W. I., Gorodkin S. R., Novikova Z. A. The influence of ferroparticle concentration and size on mr fluid properties. *Proceedings of the 6th International Conference on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions, and Their Applications*, World Scientific, Singapore. 1997, 22–25, pp. 535–542.
- [3] Rosenfeld N., Wereley N. M., Radhakrishnan R., Sudarshan T. Nanometer and micron sized particles in a bidisperse magnetorheological fluid. *Int. J. Mod. Phys. B* 16(17–18), 2392–2398, 2002.
- [4] Guan J. G., Wang W., Gong R. Z., Yuan R. Z., Gan L. H., Tam K. C. One-step synthesis of cobalt-phthalocyanine/iron nanocomposite particles with high magnetic susceptibility. *Langmuir* 18(11), 4198–4204, 2002.
- [5] Zubietta M., Eceolaza S., Elejabarrieta M. J., Bou-Ali M. M. Magnetorheological fluids: characterization and modeling of magnetization. *Smart Materials and Structures*. 18(9), 095019. doi:10.1088/0964-1726/18/9/095019, 2009.
- [6] Park J. H., Park O. Ok. Electrorheology and magnetorheology, *Korea-Aust Rheol.J.* 13(1), 13-17, 2001.
- [7] Munoz B. C., Adams G. W., Ngo V. T., Kitchin J. R. Stable Magnetorheological Fluids, *US Patent* 6203717, 2001.
- [8] J. Claracq, J. Sarrazin, J. P Montfort. Viscoelastic properties of magnetorheological fluids, *Rheologica Acta* 43(1), 38-43, 2004.
- [9] K. Butter et al. Direct observation of dipolar chains in ferrofluids in zero field using cryogenic electron microscopy, *Journal Phys. Condens. Matter*. 15(15), 1451-1470, 2003.

-
- [10] Từ Diệp Công Thành (Trường ĐH Bách khoa TP.HCM), Điều khiển Tele-Manipulator, *Tạp chí Phát triển KH&CN*, tập 13, số K5 - 2010.
- [11] Nguyễn Ngọc Điệp, Nguyễn Quốc Hưng, Nguyễn, Viễn Quốc, Huỳnh, Công Hào, Lê Duy Tuấn, Nguyễn Ngọc Tuyền, Lãng Văn Thắng. Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo mô hình tay máy sao chép chuyển động và phản hồi lực, *Hội nghị toàn quốc Máy và Cơ cấu*, 2015, Thành phố Hồ Chí Minh.
- [12] Li W. H., Liu B., Kosasih P. B., Zhang X. Z. A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications, *Sensors and Actuators*, Vol.137, Issue 2, 308-320, 06/2007.
- [13] Nguyen P. B., Oh J. S., Choi S. B. A novel 2-DOF haptic master device using bi-directional magneto-rheological brakes: modelling and experimental investigation, *International Journal of Materials and Product Technology*, 44(3/4), 216, 2012.
- [14] Nguyen Q. H., Choi S. B. Optimal design methodology of magnetorheological fluid based mechanisms, *Smart Actuation and Sensing Systems*, doi:10.5772/51078, 10/2012.
- [15] K. Toda, H. Furuse, Extension of Einstein's Viscosity Equation to That for Concentrated Dispersions of Solutes and Particles, *J Biosci. Bioeng.* 102(6), 524-528, 2006.
- [16] Choi J. U., Choi Y. T., Wereley N. M. Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers, *Smart Material and Structures*, doi:10.1117/12.483975, 2003.
- [17] Le D. T., Nguyen N. D., Le D. T., Nguyen N. T., Pham V. V., Nguyen Q. H. Development of Magnetorheological Brake with Tooth-Shaped Disc for Small Size Motorcycle, *Applied Mechanics and Materials*, 889, 508–517, 2019.
- [18] Song B. K., Nguyen Q. H., Choi S. B., Woo J. K. The impact of bobbin material and design on magnetorheological brake performance, *Smart Materials and Structures*, 22(10), 105030, 2013.
-

-
- [19] Division P. S. Rotary Seal Design Guide (Parker Hannifin Corporation), *Catalog EPS*, 5350, 2006..
- [20] Brian E S 2005 Research for dynamic seal Friction modeling in linear motion hydraulic piston applications, *Master of Science Thesis University of Texas at Arlington, USA*.
- [21] Raju Ahamed, Choi S. B., Ferdaus M. M. A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(10), 2051-2095, 2018.
- [22] J PHUONG PHAN DG.
- [23] Mukhopadhyay A., Maulik U., Bandyopadhyay, S. Multiobjective Genetic Algorithm-Based Fuzzy Clustering of Categorical Attributes. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(5), 991–1005, (2009).
- [24] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197.2002.
- [25] Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science*, 849–858, 2000), doi:10.1007/3-540-45356-3_8.
- [26] V.I. Utkin, Variable Structure systems with Sliding Modes. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22, 2, 212-222, 1977.
- [27] Nguyen P. B., Choi S. B. A Bi-Directional Magneto-Rheological Brake for Medical Haptic System: Optimal Design and Experimental Investigation, *Advanced Science Letters*, 13(1), 165-172, 2012.
- [28] E. Garcia, J. C. Arevalo, G. Muñoz, P. Gonzalez-de-Santos. Combining series elastic actuation and magneto-rheological damping for the control of agile locomotion, *Robotics and Autonomous Systems*, 59(10), 827-839, 25/06/2011.

-
- [29] Scott Winter and M. Bouzit. Use of magnetorheological fluid in a force feedback glove, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 2-8, 2007.
- [30] Blake J., Gurocak H. B. Haptic Glove With MR Brakes for Virtual Reality, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 14(5), 606-615, 11/2009.
- [31] Oh J S, Choi S H and Choi S B, Design of a 4-DOF MR haptic master for application to robot surgery: virtual environment work, *Smart Material and Structures*, Vol.23(9),2014.
- [32] Najmaei. N., Asadian. A., Kermani, M., Patel. R. Design and Performance Evaluation of a Prototype MRF-based Haptic Interface for Medical Applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–1, 2015.
- [33] V.I. Utkin, Variable Structure systems with Sliding Modes. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22, 2, 212-222, 1977.
- [34] Najmaei. N., Asadian. A., Kermani, M., Patel. R. Design and Performance Evaluation of a Prototype MRF-based Haptic Interface for Medical Applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1–1, 2015.
- [35] Nguyen Q. H., Diep B.T., Vo V. C., Choi S. B. Design and simulation of a new bidirectional actuator for haptic systems featuring MR fluid, *Proc. of SPIE Vol. 10164*, 101641O, 2017.
- [36] Diep B.T., Le D. H., Vo V. C., Nguyen Q. H. Performance evaluation of a 2D-haptic joystick featuring bidirectional magneto rheological actuators, Springer Nature Singapore Pte Ltd, doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_73, 2018.
- [37] Diep B. T., Le D. H., Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim J. K. Design and Experimental Evaluation of a Novel Bidirectional Magnetorheological Actuator, *Smart Materials and Structures*, 29 117001, 21/09/2020.
-

[38] Diep B. T., Nguyen Q. H., Kim J. H., Choi S. B. Performance evaluation of a 3D haptic joystick featuring two bidirectional MR actuators and a linear MRB, *Smart Materials and Structures*, 30 017003, 01/12/2020.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Diep B. T., Le D. H., Nguyen Q. H., Choi S. B., Kim J. K. Design and Experimental Evaluation of a Novel Bidirectional Magnetorheological Actuator, *Smart Materials and Structures*, **29** 117001, 21/09/2020.
2. Diep B. T., Nguyen Q. H., Kim J. H., Choi S. B. Performance evaluation of a 3D haptic joystick featuring two bidirectional MR actuators and a linear MRB, *Smart Materials and Structures*, **30** 017003, 01/12/2020.
3. Diep B. Tri., Le D. Hiep, Vu V. Bo., Nguyen T. Nien., Duc -Dai Mai., Nguyen Q. Hung. A sliding mode controller for force control of magnetorheological haptic joysticks, *Modern Mechanics and Applications, LNME*, pp. 1–13, 2022, https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_83.
4. Diep B. T., Nuyen N. D., Tran T. T., Nguyen Q.H. Design and experimental validation of a 3-DOF force feedback system featuring spherical manipulator and magnetorheological actuators, *Actuators*, **9(1)**, 19, 2020.
5. Nguyen Q. H., Diep B.T., Vo V. C., Choi S. B. Design and simulation of a new bidirectional actuator for haptic systems featuring MR fluid, *Proc. of SPIE*, Vol. 10164, 101641O, 2017.
6. Diep B.T., Le D. H., Vo V. C., Nguyen Q. H. Performance evaluation of a 2D-haptic joystick featuring bidirectional magneto rheological actuators, *Springer Nature Singapore Pte Ltd*, doi.org/10.1007/978-981-10-7149-2_73, 2018.