

Tiểu ban

CƠ KHÍ

PHÂN TÍCH ĐỘ VỒNG CỦA DẦM SỬ DỤNG MẠNG NƠ RON THÔNG TIN VẬT LÝ

Bùi Văn Tuyền

Trường Đại học Thủy lợi, email: tuyenbv@tlu.edu.vn

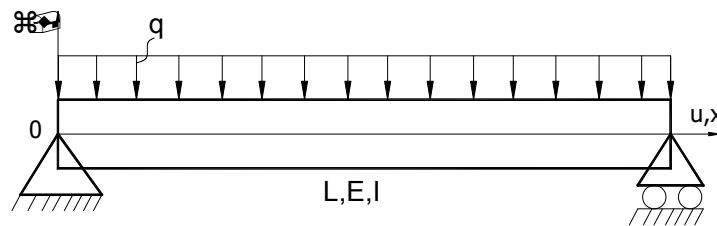
1. GIỚI THIỆU CHUNG

Mạng nơ ron thông tin vật lý (Physics-Informed Neural Networks viết tắt là PINNs) là một phương pháp học sâu có khả năng tính toán các bài toán vi phân thường (ODEs) và đạo hàm riêng (PDEs) bằng cách kết hợp trực tiếp các định luật vật lý vào quá trình huấn luyện mạng nơ-ron. Thay vì chỉ dựa vào dữ liệu huấn luyện, PINNs tích hợp các phương trình mô tả hiện tượng cơ học – chẳng hạn như phương trình cân bằng, định luật bảo toàn động lượng hay mô hình vật liệu... vào hàm mất mát, giúp mô hình học được nghiệm gần đúng của các bài toán vật lý mà không cần chia lưới. Phương pháp này được đề xuất lần đầu bởi Raissi và cộng sự với ứng dụng giải các PDEs phi tuyến [1]. Trong lĩnh vực cơ học, PINNs đã được áp dụng rộng rãi để mô phỏng biến dạng đàn hồi, phân tích ứng suất - biến dạng và truyền nhiệt. Haghighat và cộng sự đã chứng minh rằng PINNs có thể giải các bài toán biến dạng lớn với độ chính xác cao [2]. Abueidda và cộng sự áp dụng PINNs trong phân tích vật liệu composite và đạt kết quả tốt dù lượng dữ liệu đầu vào hạn chế [3]. Ngoài ra, Zhu và cộng sự cho thấy PINNs có thể truy ngược trường ứng suất từ dữ liệu biến dạng ngoài, ứng dụng hiệu quả trong chẩn đoán kết cấu [4]. Tuy nhiên, PINNs cũng gặp một số hạn chế như hiệu suất kém với bài toán cứng, khó huấn luyện với hình học phức tạp và phụ thuộc nhiều vào siêu tham số. Các biến thể như XPINNs [5], fPINNs [6] và DeepONet [7] đã được phát triển để cải thiện hiệu năng mô phỏng và khả năng tổng quát hóa.

Nghiên cứu này ứng dụng mạng nơ ron thông tin vật lý (PINNs) để dự đoán biến dạng của dầm đơn giản chịu tải phân bố đều. PINNs kết hợp phương trình đạo hàm riêng mô tả mối quan hệ giữa tải trọng và biến dạng của kết cấu với dữ liệu thực trong quá trình huấn luyện, giúp mô hình tuân thủ điều kiện vật lý và khớp dữ liệu đồng thời.

2. MÔ HÌNH TOÁN

2.1. Dầm Euler-Bernoulli



Hình 1. Dầm đơn giản chịu tải phân bố đều

Dầm đơn giản có chiều dài L , độ cứng chống uốn EI không đổi, chịu lực tác dụng phân bố đều q . Theo lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, phương trình vi phân độ võng tĩnh của dầm có dạng

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -q \quad (1)$$

Thực hiện phép tích phân và áp các điều kiện biên tại hai đầu dầm

+ Độ võng bằng 0 tại hai đầu dầm

$$y(0) = 0; y(L) = 0 \quad (2)$$

+ Mô men bằng 0 tại hai đầu dầm

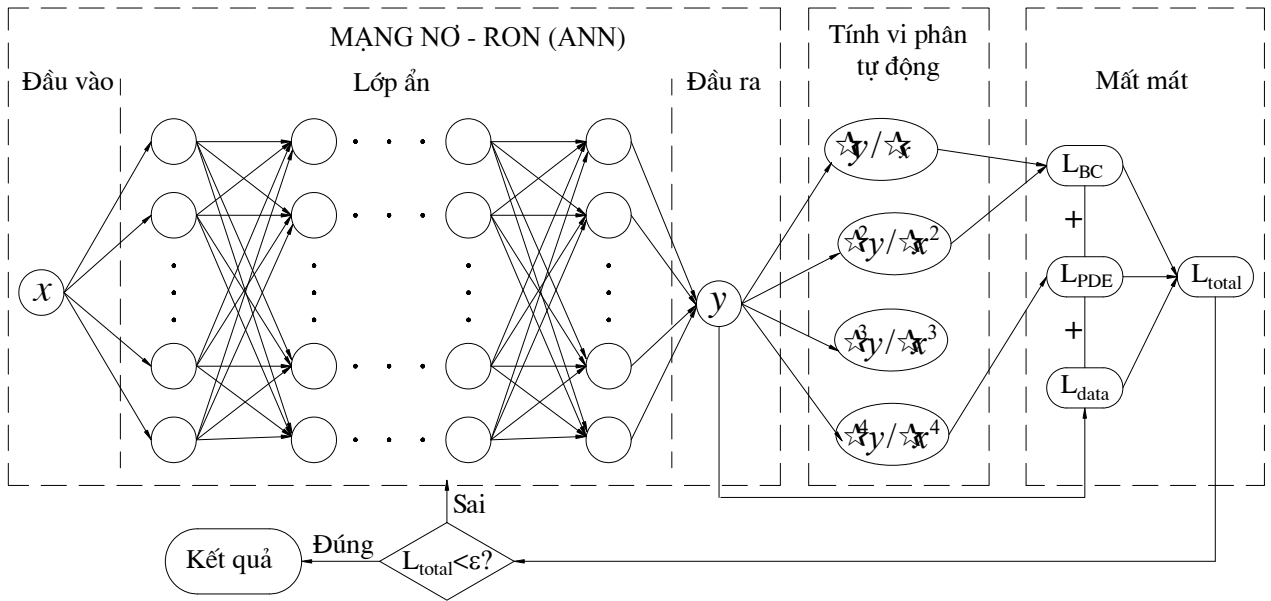
$$\begin{aligned} M(0) &= -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0 \rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0 \\ M(L) &= -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0 \rightarrow \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Ta được nghiệm giải tích xác định độ võng của dầm là:

$$y(x) = \frac{q}{24EI} (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) \quad (4)$$

2.2. Mạng nơ-ron thông tin vật lý cho dầm

Hình 2 minh họa kiến trúc tổng quát của mạng nơ-ron học sâu có tích hợp thông tin vật lý (Physics-Informed Neural Networks – PINNs) được ứng dụng cho bài toán phân tích độ võng của dầm chịu uốn. Cấu trúc mạng bao gồm các thành phần chính như sau:



Hình 2. Mô hình mạng nơ-ron thông tin vật lý

Lớp đầu vào

Lớp đầu vào nhận giá trị biến x là các điểm dọc theo chiều dài dầm tương ứng là độ võng y_{true} . Đây là biến mà mạng được yêu cầu dự đoán giá trị độ võng và các đạo hàm liên quan. Giá trị độ võng tương ứng được xác định bằng thực nghiệm hoặc có thể tính toán tại một số vị trí theo FEM để làm cơ sở cho huấn luyện.

Mạng nơ-ron học sâu (Deep Neural Network-ANN)

Trong phân tích này mạng nơ-ron truyền thẳng nhiều lớp (FNN) được lựa chọn đóng vai trò học ánh xạ từ không gian đầu vào x đến đầu ra y , là giá trị độ võng do mạng dự đoán. Kiến trúc mạng bao gồm nhiều lớp ẩn với các hàm kích hoạt. Ở đây tác giả lựa chọn hàm *tanh* vì tính trơn và đạo hàm có tính liên tục, cho phép tính toán đạo hàm bậc cao một cách hiệu quả thông qua vi phân tự động (automatic differentiation). Số lượng lớp ẩn và số nơ-ron trong từng lớp được lựa chọn bằng nhau. Tập tham số của sẽ được huấn luyện sao cho kết quả đầu ra thỏa mãn các điều kiện vật lý của bài toán và dữ liệu thu thập được.

Cơ chế vi phân tự động

Một trong những đặc trưng của PINNs là khả năng tính toán đạo hàm bậc cao của hàm đầu ra $y(x)$ đối với đầu vào x nhờ vào vi phân tự động. Quá trình này được thực hiện thông qua quy tắc chuỗi (chain rule).

Hàm mất mát (loss function)

Trong PINNs, hàm mất mát (loss function) là thành phần cốt lõi, giúp mô hình không chỉ khớp với dữ liệu, mà còn tuân thủ phương trình vật lý, cụ thể mất mát dữ liệu quan sát được (data loss - L_{data}), điều kiện biên (boundary loss - L_{BC}) và luật vật lý tuân theo phương trình vi phân (physics loss - L_{PDE}).

Mất mát so với dữ liệu quan sát (L_{data}) được đánh giá qua tiêu chí sai số bình phương trung bình (MSE), trong đó N là số lượng điểm để tính dữ liệu dọc theo chiều dài dầm, y_{true} giá trị thực tế, y_i giá trị dự đoán tại x_i .

$$L_{data} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{true}(x_i) - y(x_i)|^2 \quad (5)$$

Mất mát thỏa mãn phương trình vi phân độ võng của dầm

$$L_{PDE} = \frac{1}{N_{DE}} \sum_{i=1}^{N_{DE}} \left| EI \frac{d^4 y(x_i)}{dx^4} + q \right|^2 \quad (6)$$

trong đó N_{DE} là số lượng điểm tính mất mát của phương trình vi phân, trong trường hợp này lấy bằng N

Mất mát thỏa mãn điều kiện biên của bài toán

$$\begin{aligned} L_{BC} &= L_{BC1} + L_{BC2} + L_{BC3} + L_{BC4} \\ L_{BC1} &= |y(x=0) - 0|^2 & L_{BC3} &= |y''(x=0) - 0|^2 \\ L_{BC2} &= |y(x=L) - 0|^2 & L_{BC4} &= |y''(x=L) - 0|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Tổng mất mát là:

$$L_{total} = L_{PDE} + L_{BC} + L_{data} \quad (8)$$

Khi đã có hàm mất mát (loss function), quá trình tối ưu hóa diễn ra bằng cách tính độ giảm của hàm mất mát theo từng trọng số qua thuật toán lan truyền ngược. Sau đó, trọng số được cập nhật sử dụng thuật toán Adam với tốc độ học nhất định. Quá trình này được lặp đi lặp lại nhiều lần (epoch) cho đến khi mất mát giảm xuống đủ thấp hoặc mạng hội tụ.

3. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN

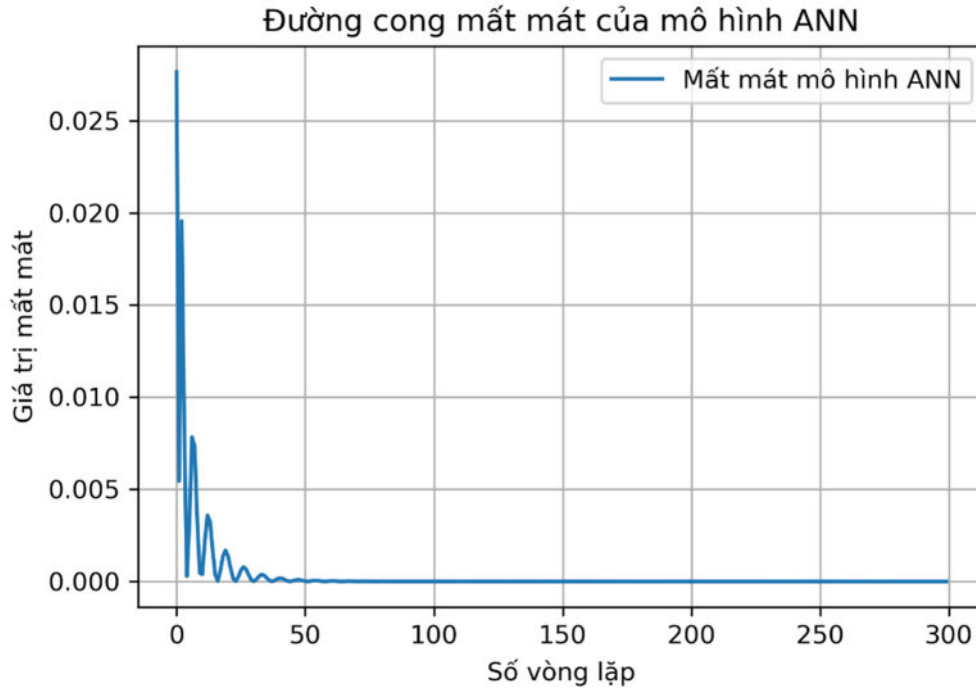
Để thuận tiện cho tính toán, và làm sáng tỏ hiệu quả của việc sử dụng mô hình PINNs trong dự đoán độ võng của dầm. Kích thước của dầm lấy như sau: chiều dài dầm $L = 1\text{m}$, Độ cứng chống uốn của dầm $EI = 1 \text{ N.m}^2$, tải trọng phân bố đều $q = 1 \text{ N/m}$.

Bảng 1. Các thông số của mô hình

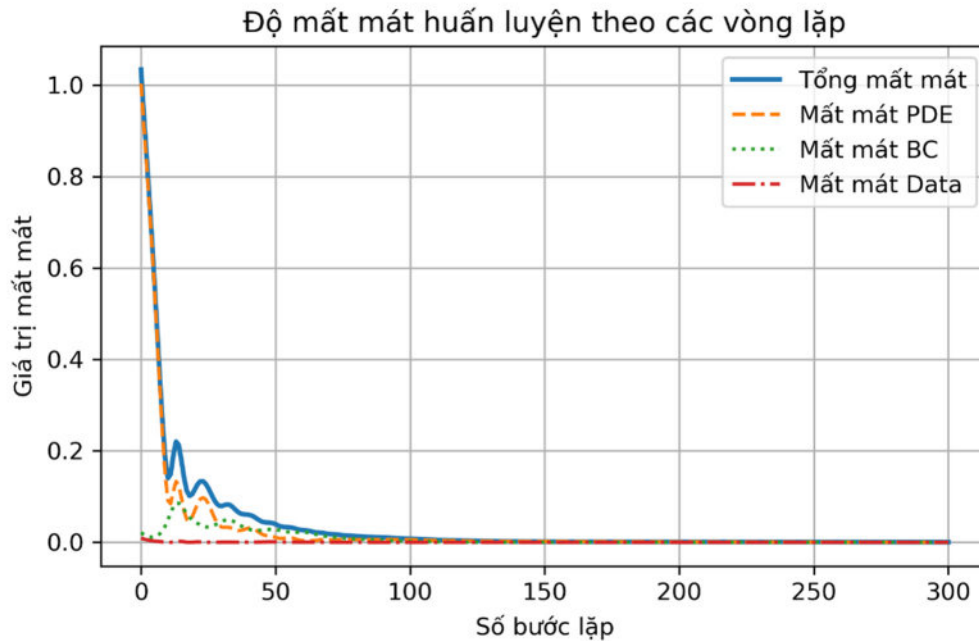
Tham số	Giá trị
Bước lặp (epoch)	300
Tốc độ học (learning rate)	0.001
Hàm tối ưu (optimizer)	Adam
Đầu vào (input)	1
Hidden layer	50
Số lượng nơ-ron mỗi lớp	5
Đầu ra (output)	1
Hàm kích hoạt	tanh

Trong nghiên cứu này, dầm được chia thành 21 điểm cách đều nhau bằng 0.05m được dùng để tính cho việc huấn luyện mạng ANN và các điểm nội suy trong PINNs. Hai điểm tại gối của dầm ($x=0$ và $x=1$) là các điểm bao. Như vậy các điểm $x_i \in (0,1)$. Sử dụng công thức (4) để tính toán các giá trị đầu ra thực tế. Mạng PINNs được huấn luyện với 300 bước lặp ở tốc độ học $\eta = 0.001$, sử

dụng thuật toán tối ưu Adam. Kiến trúc của mô hình gồm 1 lớp đầu vào, 5 lớp ẩn và 1 lớp đầu ra. Mỗi lớp ẩn có 50 nơ ron, sử dụng hàm tanh làm hàm kích hoạt. Một mạng Nơ ron (ANN) cũng được huấn luyện với những thông số như trên nhằm mục đích so sánh. Cả hai mô hình đều được phát triển ngay từ đầu bằng Pytorch. Mô hình ANN đã trải qua quá trình đào tạo bằng cách sử dụng cấu hình được nêu trong Bảng 1. Sau khi hoàn tất 300 bước đào tạo, một đường cong mất mát cho mô hình đã được tạo ra, thể hiện trực quan trong Hình 3. Đường cong này đóng vai trò là một công cụ có giá trị để đánh giá sự hội tụ và hiệu suất của mô hình trong suốt quá trình đào tạo.



Hình 3. Đường cong mất mát huấn luyện mạng ANN



Hình 4. Đường cong mất mát huấn luyện mạng PINNs

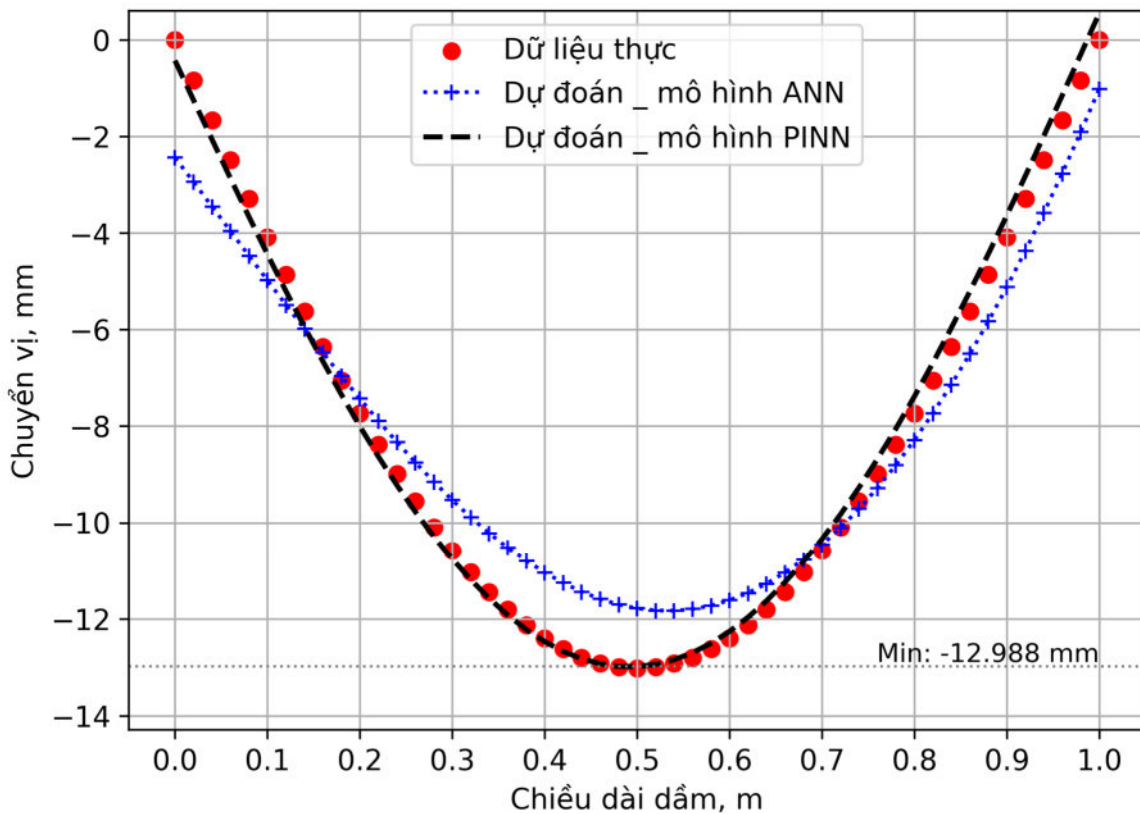
Hình 3 thể hiện sự biến thiên của hàm mất mát theo số bước lặp trong quá trình huấn luyện. Quan sát tổng thể cho thấy giá trị mất mát đều giảm mạnh tại giai đoạn đầu huấn luyện (từ bước 0 đến khoảng bước 20), sau đó giảm dần chậm hơn và tiệm cận về giá trị gần 0 ở khoảng bước lặp thứ 50.

Hình 4 thể hiện sự biến thiên của các thành phần hàm mất mát theo số bước lặp trong quá trình huấn luyện. Quan sát tổng thể cho thấy các thành phần mất mát đều giảm mạnh tại giai đoạn đầu huấn luyện (từ bước 0 đến khoảng bước 30), sau đó giảm dần chậm hơn và tiệm cận về giá trị gần 0. Cụ thể:

- Mất mát PDE khởi đầu ở giá trị cao nhất, xấp xỉ 1.1, giảm nhanh trong 20 bước lặp đầu tiên xuống khoảng 0.2, rồi tiếp tục giảm từ từ và ổn định quanh mức gần 0 từ sau bước 100.
- Mất mát điều kiện biên ban đầu nhỏ hơn mất mát PDE, dao động quanh giá trị ~ 0.1 , giảm nhanh về khoảng 0.05 và duy trì ổn định.
- Mất mát dữ liệu duy trì giá trị rất nhỏ và ít biến động trong toàn bộ quá trình huấn luyện, thể hiện dữ liệu huấn luyện được khớp tốt từ sớm.
- Mất mát tổng, là tổng hợp của các thành phần trên, có xu hướng giảm đồng bộ với mất mát PDE, phản ánh vai trò chi phối của điều kiện phương trình PDE trong quá trình tối ưu hóa.

Kết quả trên cho thấy mô hình học sâu đã học được mối quan hệ ràng buộc bởi PDE và điều kiện biên một cách hiệu quả. Việc mất mát dữ liệu giữ giá trị rất thấp phản ánh khả năng khớp dữ liệu thực nghiệm tốt ngay từ đầu, trong khi thành phần mất mát PDE mới là yếu tố quyết định tốc độ hội tụ tổng thể. Quá trình giảm mất mát ổn định và không có dấu hiệu dao động lớn sau giai đoạn đầu cho thấy quá trình tối ưu hóa diễn ra suôn sẻ và đạt trạng thái gần cực tiểu toàn cục.

Mô hình ANN học nhanh và dễ huấn luyện nếu dữ liệu đầy đủ, nhưng không đảm bảo ràng buộc vật lý. Mô hình PINNs phức tạp hơn, hội tụ chậm hơn một chút nhưng có khả năng khái quát tốt hơn, đảm bảo điều kiện vật lý ngay cả với ít dữ liệu.



Hình 5. Sự phân bố độ võng của dầm theo chiều dài dầm

Hình 5 và số liệu trong Bảng 2 cung cấp cái nhìn tổng quan về hiệu năng dự đoán của hai mô hình học máy – ANN và PINN – trong bài toán dự đoán chuyển vị dầm chịu tải phân bố đều. Về mặt hình dạng, cả hai mô hình đều tái hiện được đường cong độ võng có đặc tính hình parabol, với độ võng cực đại xuất hiện tại vị trí giữa dầm ($x = 0.5$ m). Tuy nhiên, mô hình ANN cho thấy sự sai lệch đáng kể so với dữ liệu thực, đặc biệt tại vùng chuyển vị lớn nhất, trong khi mô hình PINN thể hiện sự tương thích gần như hoàn toàn với dữ liệu đo đạc trong toàn miền.

Xét về mặt định lượng, tại vị trí $x = 0.5$ m, nơi chuyển vị đạt giá trị cực tiểu, sai số tuyệt đối của ANN là 1.090 mm, cao gấp hơn 100 lần sai số tương ứng của PINN là 0.010 mm. Ngoài ra, các điểm biên ($x = 0$ và $x = 1$ m) vốn là vị trí ràng buộc điều kiện biên trong mô hình vật lý được PINN mô phỏng rất chính xác (sai số gần bằng 0), trong khi ANN vẫn xuất hiện sai số lần lượt là 0.901 mm và 0.899 mm. Tổng thể, sai số trung bình bình phương (MSE) của PINN là 0.410 mm, thấp hơn đáng kể so với 0.892 mm của ANN. Đặc biệt, hệ số xác định R^2 phản ánh mức độ giải thích phương sai dữ liệu của mô hình đạt 0.997 đối với PINN, thể hiện khả năng khớp cực kỳ tốt với dữ liệu thực, trong khi ANN chỉ đạt $R^2 = 0.968$, cho thấy mô hình này không lý giải được đầy đủ biến thiên trong tập dữ liệu.

Bảng 2. MSE và R^2 của hai mô hình ANN và PINNs

Tham số	Mô hình ANN	Mô hình PINNs
MSE	1.0756e-06	8.698e-08
R^2	0.937	0.995

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chỉ ra rằng mô hình mạng nơ-ron vật lý (PINN) có độ chính xác vượt trội so với mạng nơ-ron truyền thống (ANN) trong việc dự đoán biên dạng của các kết cấu chịu tải. Khác với ANN chỉ học từ dữ liệu, PINN tích hợp trực tiếp các phương trình đạo hàm riêng đặc trưng cho ứng xử cơ học của hệ vào trong quá trình huấn luyện, từ đó đảm bảo lời giải tuân thủ các định luật vật lý và điều kiện biên. Nhờ đó, mô hình không những giảm sai số nội suy mà còn có khả năng khái quát tốt hơn trong các miền chưa có dữ liệu đo đạc. Sự kết hợp giữa dữ liệu thực nghiệm và định luật vật lý trong PINN giúp cải thiện độ tin cậy và ổn định của mô hình, đặc biệt trong các bài toán mà dữ liệu đầu vào khan hiếm hoặc nhiễu. Ngoài ra, việc duy trì nhất quán với các nguyên lý cơ học nền tảng còn giúp PINN tránh được hiện tượng quá khớp mà ANN dễ mắc phải. Chính nhờ các đặc điểm này, PINN thể hiện tiềm năng ứng dụng lớn trong các bài toán cơ học tính toán hiện đại, nơi yêu cầu mô hình hóa chính xác, khả năng mở rộng và độ tin cậy cao là những tiêu chí then chốt.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.
- [2] Haghighat, E., Raissi, M., Moure, A., Gomez, H., & Juanes, R. (2021). A physics-informed deep learning framework for inversion and surrogate modeling in solid mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 379, 113741.
- [3] Abueidda, D. W., Koric, S., Sobh, N. A., & Elbanna, A. E. (2023). Meshless physics-informed neural networks for forward and inverse problems in solid mechanics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 191, 110034.
- [4] Zhu, Y., Zabarar, N., Koutsourelakis, P. S., & Perdikaris, P. (2021). Physics-constrained deep learning for high-dimensional surrogate modeling and uncertainty quantification without labeled data. *Nature Machine Intelligence*, 3(2), 102–113.
- [5] Jagtap, A. D., Kawaguchi, K., & Karniadakis, G. E. (2020). Extended physics-informed neural networks (XPINNs): A generalized space-time domain decomposition based deep learning framework for nonlinear partial differential equations. *Communications in Computational Physics*, 28(5), 2002–2041.
- [6] Wang, S., Wang, H., & Perdikaris, P. (2021). Learning PDEs using neural networks with Fourier spectral methods. *Journal of Computational Physics*, 428, 109914.
- [7] Lu, L., Jin, P., & Karniadakis, G. E. (2021). DeepONet: Learning nonlinear operators for identifying differential equations based on the universal approximation theorem of operators. *Nature Machine Intelligence*, 3(3), 218–229.

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH QUẢN LÝ NHIỆT TRÊN XE Ô TÔ ĐIỆN BẰNG PHẦN MỀM MATLAB SIMULINK

Nguyễn Văn Kỵ, Nguyễn Anh Tuấn

Trường Đại học Thủy lợi, email: Nguyenvankuu123@thu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hiện nay, để giảm sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch và hạn chế phát thải khí nhà kính, nên ngành giao thông vận tải đang diễn ra quá trình chuyển đổi mạnh mẽ từ phương tiện sử dụng động cơ đốt trong sang phương tiện điện, trong đó công nghệ pin đóng vai trò trung tâm. Mặc dù công nghệ pin đã có nhiều tiến bộ đáng kể, nhưng vẫn gặp phải những thách thức liên quan đến thiết kế và tối ưu hóa hệ thống quản lý nhiệt (Thermal Management System – TMS). Các cụm pin chỉ hoạt động hiệu quả trong một khoảng nhiệt độ hẹp (thường từ 15°C đến 40°C), vượt quá giới hạn này có thể dẫn đến suy giảm nhanh chóng tuổi thọ, mất dung lượng và trong những trường hợp nghiêm trọng còn gây ra quá nhiệt, [1]. Để giải quyết vấn đề này, nhiều hướng tiếp cận TMS đã được nghiên cứu, bao gồm làm mát bằng không khí, chất lỏng, vật liệu chuyển pha và các giải pháp lai, nhằm hạn chế gia tăng nhiệt độ cũng như đồng đều hóa phân bố nhiệt, [2], [3]. Mặt khác, TMS của xe điện hiện đại không chỉ tập trung vào cụm pin mà còn cần quản lý nhiệt cho toàn bộ phương tiện. Các thành phần như động cơ điện, bộ biến tần, hệ thống HVAC và hệ thống làm mát, hệ thống truyền động đều tham gia vào cân bằng nhiệt tổng thể nên thiết kế TMS mang tính tích hợp toàn xe là xu thế tất yếu để đảm bảo hiệu suất, an toàn và tối ưu hóa phạm vi hoạt động của xe điện. Tuy nhiên, việc kiểm chứng các hệ thống này bằng thực nghiệm thường gặp nhiều trở ngại do chi phí cao, cấu hình kỹ thuật phức tạp và chu kỳ phát triển dài, khiến việc kiểm tra toàn bộ các kịch bản thiết kế trong điều kiện thực tế trở nên khó khả thi. Vì vậy, mô hình hóa và mô phỏng số ở cấp hệ thống đã trở thành công cụ không thể thiếu để đẩy nhanh nghiên cứu quản lý nhiệt cho xe điện. Trong đó, MATLAB/Simulink nổi bật như một nền tảng tích hợp và linh hoạt, cho phép kết hợp các mô hình điện-nhiệt của pin, mô hình động lực học chất lỏng của mạch làm mát, đặc tính nhiệt của động cơ điện và bộ biến tần, cũng như nhu cầu nhiệt từ hệ thống HVAC trong cùng một khung tính toán thống nhất, nền tảng này còn cho phép kiểm tra nhiều điều kiện vận hành khác nhau, bao gồm chu trình lái xe phức tạp, biến đổi nhiệt độ môi trường và các kịch bản sự cố, những điều vốn khó và tốn kém khi thực hiện bằng thí nghiệm. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc phát triển mô hình và mô phỏng hệ thống quản lý nhiệt trên xe ô tô điện bằng phần mềm Matlab Simulink nhằm đáp ứng nhu cầu thực tiễn, cung cấp một phương pháp có khả năng mở rộng để đánh giá nhiều cấu trúc và giải pháp điều khiển để đẩy nhanh quá trình phát triển xe điện thế hệ mới.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH

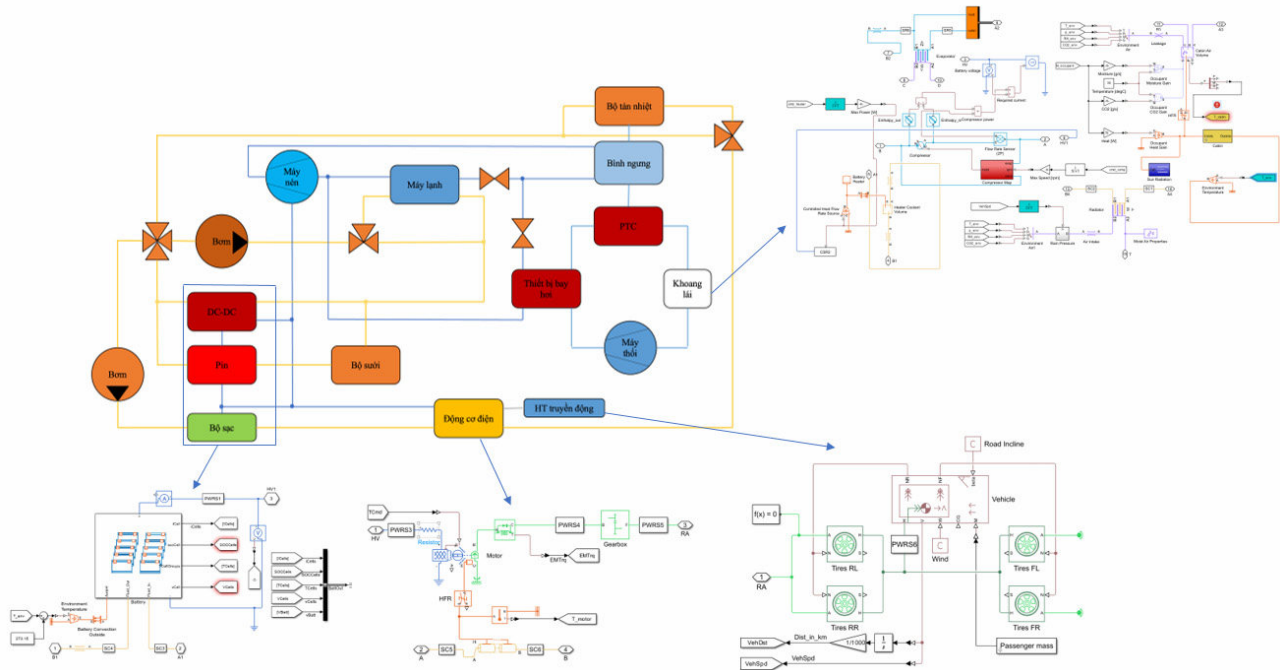
Trên cơ sở cấu tạo của xe điện Tesla model-3, mô hình được xây dựng trong môi trường Simscape (MATLAB/Simulink) với mục tiêu mô phỏng hệ thống quản lý nhiệt cho xe điện (EV). Cấu trúc của mô hình bao gồm bốn khối chính như trên hình 1, [4], [5]:

Khối động lực điện: Gồm pin lithium-ion, bộ chuyển đổi, và động cơ điện. Trong đó, Pin được mô hình hóa gồm 2500 tế bào hình trụ (định dạng 21700), với tổng năng lượng 48 kWh, đặc tính điện áp–dòng điện phụ thuộc vào SOC (State of Charge) và nhiệt độ.

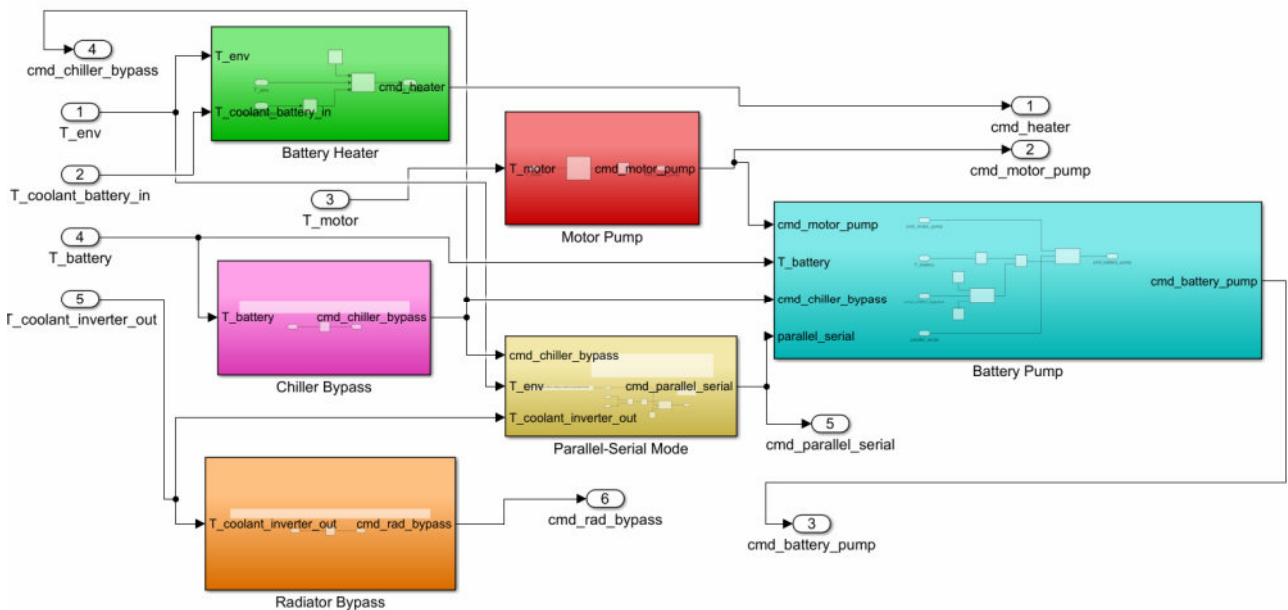
Khối tải: Mô phỏng điều kiện vận hành thực tế dựa trên chu trình lái thực tế. Động lực học dọc của xe, bao gồm lực cản khí động, lực cản lăn và độ dốc đường, được tích hợp nhằm xác định nhu cầu kéo. Cách tiếp cận này bảo đảm TMS được đánh giá trong điều kiện biến đổi, phản ánh đúng tải nhiệt thực tế.

Hệ thống làm mát bằng chất lỏng: Vòng tuần hoàn làm mát gồm bơm, kết tản nhiệt, van và các bộ trao đổi nhiệt dạng tấm kết nối với pin, nghịch lưu và động cơ. Chất làm mát (thường là dung dịch nước-glycol) được mô tả với các đặc tính nhiệt phụ thuộc nhiệt độ. Sự phân phối dòng chảy và điều khiển đóng/mở van cho phép hệ thống điều hướng việc loại bỏ nhiệt tại các vị trí ưu tiên, nâng cao tính đồng đều nhiệt.

Bộ điều khiển nhiệt: Thu thập tín hiệu từ nhiệt độ pin, động cơ, và môi trường. Các tín hiệu phản hồi từ pin, động cơ và môi trường được xử lý để đưa ra lệnh điều khiển. Thuật toán điều khiển dựa trên ngưỡng nhiệt độ, đảm bảo giảm thiểu tiêu hao phụ trợ nhưng vẫn duy trì an toàn nhiệt như trên hình 2.



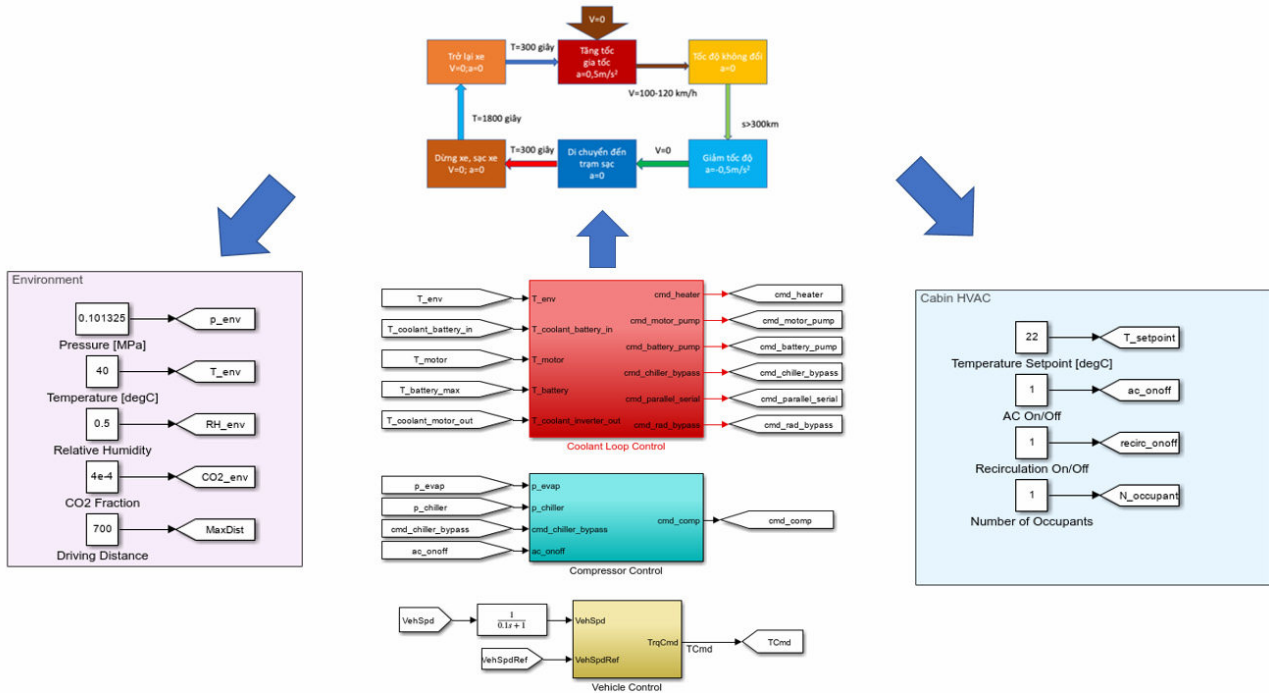
Hình 1. Mô hình hệ thống quản lý nhiệt trên phần mềm Matlab Simulink



Hình 2. Xây dựng mô hình hệ thống điều khiển

Tiến hành chạy chương trình mô phỏng với kịch bản được lập trình trên Matlab và khai báo các điều kiện biên như nhiệt độ môi trường, cabin, các thông số cho bộ điều khiển như trên hình 3. Hệ thống quản lý nhiệt được kiểm tra trong tình huống chạy xe và sạc với tổng quãng đường 500km

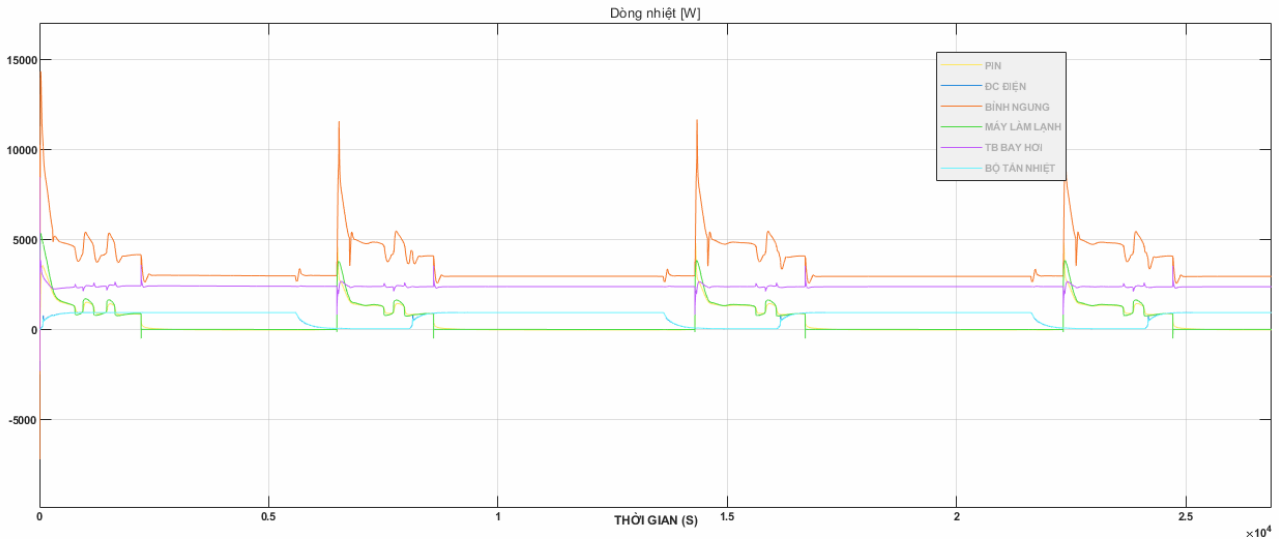
với các bước thứ tự như điều khiển tăng tốc đến tốc độ ổn định và giữ ở đó cho đến khi trạng thái sạc pin ở ngưỡng thấp hơn. Sau đó, điều khiển giảm tốc và chờ khi pin được sạc bằng cấu hình trong 30 phút. Chu kỳ này được lặp lại cho đến khi xe đạt đến khoảng cách quy định.



Hình 3. Kịch bản mô phỏng và thiết lập các thông số điều khiển

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

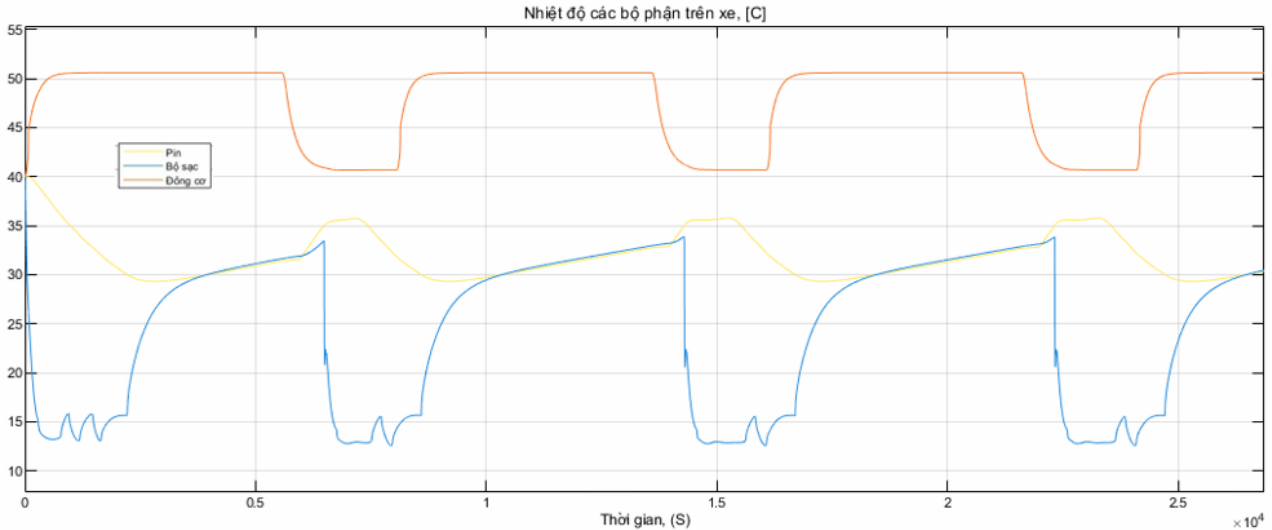
Khảo sát mô hình trên phần mềm ta thu được các đồ thị mô phỏng tổn thất năng lượng, đồ thị mô phỏng tốc độ dòng nhiệt, đồ thị mô phỏng nhiệt độ của các hệ thống trên xe, đồ thị mô phỏng nhiệt độ trên cabin như trên các hình 4, hình 5, hình 6 và hình 7.



Hình 4. Kết quả mô phỏng tốc độ dòng nhiệt, W

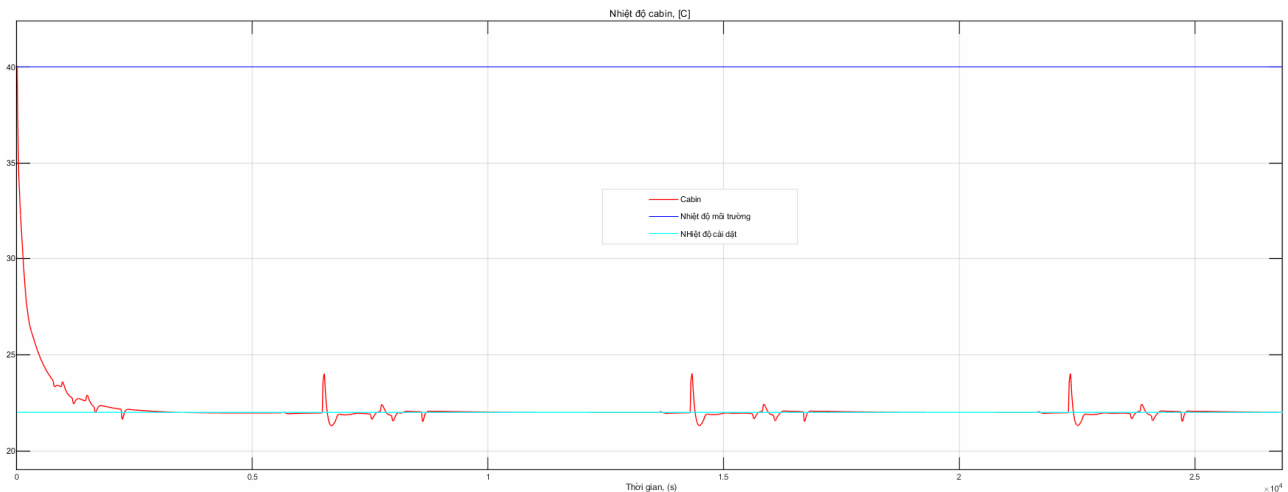
Hình 4 mô tả sự biến thiên dòng nhiệt (W) theo thời gian của các thành phần chính trong hệ thống, bao gồm pin, Động cơ điện, bình ngưng, máy nén lạnh, thiết bị bay hơi và bộ tản nhiệt. Kết quả cho thấy bộ phận bình ngưng có đặc tính dao động mạnh nhất, với đỉnh điểm đạt khoảng 15.000 W, vượt trội so với các thành phần còn lại. Trong khi đó, tốc độ dòng nhiệt của pin, động cơ điện và bộ tản nhiệt dao động trong khoảng 2.000 – 4.000W, duy trì gần như ổn định quanh giá trị trung bình. Đặc biệt, bộ phận máy làm lạnh và thiết bị bay hơi có mức dao động đồng bộ với bình ngưng,

song biên độ nhỏ hơn nhiều (chỉ khoảng 3.000 – 5.000W), phản ánh vai trò phụ thuộc của chúng trong chu trình nhiệt động. Sự khác biệt rõ rệt giữa biên độ dao động của bình ngưng và các khối phụ trợ cho thấy vai trò trung tâm của thiết bị trong việc điều tiết và phân phối tải nhiệt. Đồng thời, đặc tính ổn định của các thành phần còn lại chứng tỏ hệ thống có khả năng duy trì trạng thái cân bằng nhiệt trong hầu hết thời gian vận hành.



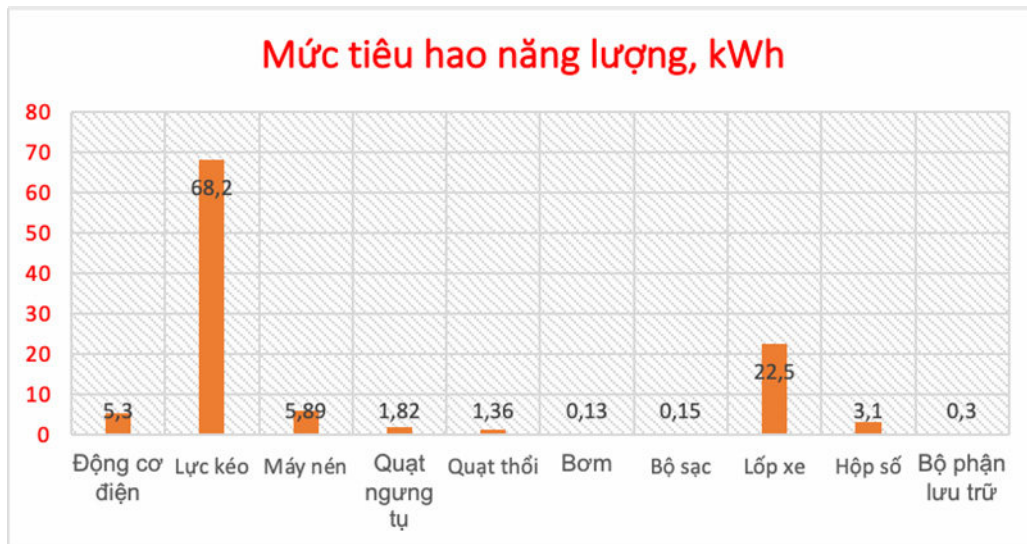
Hình 5. Kết quả mô phỏng nhiệt độ các bộ phận trên xe

Hình 5 biểu diễn sự biến thiên nhiệt độ của các thành phần chính trên xe điện, bao gồm pin, bộ sạc và động cơ, trong suốt quá trình mô phỏng. Có thể thấy rằng nhiệt độ của pin (đường màu vàng) dao động trong khoảng 28°C–40°C, tăng dần theo thời gian vận hành và được hạ xuống sau mỗi chu kỳ làm mát. Điều này phản ánh khả năng tích nhiệt cao của pin cũng như độ trễ nhiệt so với tác động trực tiếp của hệ thống làm mát. Nhiệt độ của bộ sạc (đường màu xanh) biến thiên mạnh nhất, với giá trị cực tiểu xuống đến gần 10°C và cực đại xấp xỉ 35°C, thể hiện rõ rệt ảnh hưởng trực tiếp của chu trình làm lạnh theo dạng bật/tắt chu kỳ.



Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt độ trên cabin xe

Hình 6 thể hiện sự biến thiên nhiệt độ của cabin (đường màu đỏ) so với ngưỡng nhiệt độ cài đặt (đường màu xanh lam nhạt) và nhiệt độ môi trường (đường màu xanh dương đậm). Kết quả cho thấy, ngay khi bắt đầu mô phỏng, nhiệt độ trong cabin giảm nhanh từ khoảng 45°C xuống gần mức nhiệt độ đặt, thể hiện rõ hiệu quả tức thời của hệ thống điều hòa trong giai đoạn khởi động. Sau khoảng nhất định, nhiệt độ cabin duy trì ổn định quanh giá trị mong muốn (~23–25 °C), và nhiệt độ cabin luôn nằm dưới ngưỡng đặt trên toàn bộ chu kỳ mô phỏng, chứng tỏ hệ thống điều hòa hoạt động hiệu quả và đảm bảo được sự thoải mái nhiệt cho người sử dụng.



Hình 7. Mức tiêu hao năng lượng của các hệ thống trên xe

Biểu đồ ở hình 7 thể hiện mức tiêu hao năng lượng (kWh) của các bộ phận trên xe điện. Kết quả cho thấy thành phần lực kéo chiếm tỷ trọng lớn nhất với 68,2 kWh, tiếp theo là lốp xe với 22,5 kWh, phản ánh vai trò quyết định của hai thành phần này trong tổng mức tiêu hao năng lượng. Các bộ phận khác như máy nén (5,89 kWh), động cơ điện (5,3 kWh) và hộp số (3,1 kWh) có mức tiêu hao thấp hơn đáng kể, trong khi quạt, bơm và bộ phận lưu trữ chỉ chiếm tỷ lệ rất nhỏ (< 2 kWh). Điều này chứng minh rằng năng lượng chủ yếu được sử dụng cho chuyển động và khắc phục tổn hao cơ học, trong khi hệ thống phụ trợ chỉ đóng góp một phần nhỏ. Phân tích này khẳng định việc tối ưu hóa hiệu suất lực kéo và giảm tổn thất cản lăn của lốp là yếu tố then chốt để nâng cao hiệu quả năng lượng của xe điện.

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, hệ thống quản lý nhiệt hiệu quả không những đảm bảo an toàn và tuổi thọ của pin mà còn để tối ưu hóa hiệu quả năng lượng trong xe điện. Nhiệt độ pin được quan sát thấy luôn ở mức dưới 400C nhờ các cảm biến nhiệt độ luôn theo dõi nhiệt độ của từng tế bào pin và toàn bộ pin để đưa ra các tín hiệu cho hệ thống để điều khiển hoạt động của các thành phần như quạt, bơm, và điều chỉnh nhiệt độ của nước làm mát để duy trì nhiệt độ pin ở mức tối ưu. Mặt khác, Hệ thống quản lý nhiệt còn kiểm soát các chức năng như lưu lượng, nhiệt độ và độ ẩm của không khí trong cabin, nhiệt độ của hệ thống truyền lực và hệ thống điện tử nhằm đảm bảo an toàn và hiệu suất của các hệ thống trong thời gian dài.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu trên, nhóm tác giả rút ra một số kết luận sau:

- Bài báo đã ứng dụng phần mềm Matlab Simulink để xây dựng mô hình hệ thống quản lý nhiệt trên xe ô tô điện. Nghiên cứu đã tiến hành khảo sát, mô phỏng Hệ thống quản lý nhiệt (TMS) cho xe điện, tập trung vào các tình huống lái xe đa dạng, phân tích hiệu quả làm mát và tốc độ sạc khác nhau của pin và các hệ thống trên xe nhằm chứng minh vai trò quan trọng của TMS trong việc quản lý tải nhiệt trong các điều kiện vận hành.

- Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng Matlab/Simulink mang lại lợi thế nổi bật trong mô phỏng hệ thống quản lý nhiệt của xe điện. Thay vì chỉ tập trung vào pin, mô hình cho phép mô phỏng đồng thời các nguồn sinh nhiệt chính trên xe bao gồm pin, động cơ điện, bộ biến tần, và hệ thống HVAC. Nhờ đó, nghiên cứu có thể khảo sát một cách toàn diện sự phân bố và cân bằng nhiệt dưới nhiều kịch bản vận hành khác nhau như tăng tốc, leo dốc, phanh tái sinh, hay thay đổi điều kiện môi trường. Những tình huống này rất khó hoặc tốn kém để tái hiện trong thực nghiệm, trong khi mô phỏng cho phép đánh giá nhanh, tiết kiệm chi phí và an toàn. Kết quả thu được không chỉ khẳng định vai trò then chốt của TMS trong đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy, mà còn mở ra hướng phát triển công cụ hỗ trợ thiết kế, tối ưu hóa, và kiểm định hệ thống quản lý nhiệt cho xe điện trong điều kiện thực tế.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G.G. Njema, R.B. Ouma, J.K. Kibet. 2024. A review on the recent advances in battery development and energy storage technologies. J. Renew. Energy.
- [2] L. Zhao, W. Li, G. Wang, W. Cheng, M. Chen. 2023. A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced aircooling. Appl. Therm. Eng.
- [3] M. Rabiei, A. Gharehghani, A.M. Andwari. 2023. Enhancement of battery thermal management system using a novel structure of hybrid liquid cold plate. Appl. Therm. Eng.
- [4] Simscape fluids documentation, Matlab guide.
- [5] Tesla model-3. 2023. Service Manual.

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH LƯU BIẾN CỦA CHẤT NHẦY CHIẾT XUẤT TỪ CÂY LÔ HỘI (ALOE VERA)

Nguyễn Ngọc Minh

Trường Đại học Thủy lợi, email: ngminh@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Chất nhầy thực vật là các polysaccharide có cấu trúc phức tạp được tiết ra hoặc chiết xuất từ mô thực vật, nổi bật với khả năng giữ nước, tạo gel và sửa đổi cấu trúc lưu biến của các hệ gel. Các chất nhầy này đã được nghiên cứu rộng rãi trong các lĩnh vực thực phẩm, dược phẩm và mỹ phẩm như là chất phụ gia tự nhiên thay thế cho các polyme tổng hợp [1–3]. Lô hội (*Aloe vera*) là một loài thực vật nhiệt đới hoặc cận nhiệt đới thuộc họ Liliaceae. Loài cây này có đặc điểm là lá hình mác sắp xếp thành dạng hoa thị, với mép lá có răng cưa và đầu nhọn. Lô hội đã được sử dụng trên toàn thế giới từ thời cổ đại nhờ các đặc tính y học và trị liệu. Nước ép thô của lô hội chứa hơn 98% là nước, phần còn lại bao gồm polysaccharide (trên 60% tính theo khối lượng khô), hợp chất phenolic, axit hữu cơ, enzyme, vitamin và khoáng chất [4]. Các polysaccharide bao gồm glucomannan, mannan và pectin với các khối lượng phân tử khác nhau trong lô hội có vai trò trong các hoạt tính sinh học cả in vivo lẫn in vitro [5].

Nghiên cứu các tính chất lưu biến là việc cần thiết để hiểu rõ các đặc tính cấu trúc và chức năng của sản phẩm thực phẩm. Chúng cũng rất quan trọng trong thiết kế, phát triển thiết bị chế biến và kiểm soát chất lượng. Sự thay đổi trong tính chất đàn hồi nhớt có thể ảnh hưởng đến nhu cầu năng lượng trong các quá trình chế biến. Trong mỹ phẩm, các thông số lưu biến quyết định cảm giác khi sử dụng, tính ổn định và định hướng thiết kế sản phẩm mới. Trong dược phẩm, đặc tính lưu biến góp phần kiểm soát tốc độ phóng thích dược chất, cải thiện khả năng phân liều và phát triển các hệ dẫn thuốc tiên tiến. Lad và Murthy (2013) đã nghiên cứu đặc tính gel của nước ép lô hội ở các nhiệt độ khác nhau và phát hiện lô hội thể hiện hành vi đàn hồi trong dải tần số (0,1–10 Hz), với đặc điểm dòng chảy giảm độ nhớt theo tốc độ cắt (shear-thinning behavior) [6]. Tính chất dòng chảy của thực phẩm lỏng có thể biến đổi từ Newton đến phi-Newton và có thể được mô tả bằng các phép đo cắt ổn định và hiệu chỉnh dữ liệu độ nhớt theo các mô hình toán học phổ biến như Newton, định luật lũy thừa (Ostwald–de Waele), Carreau-Yasuda, Herschel–Bulkley, Casson, Oldroyd-B, Phan Thien Tanner, Maxwell và Giesekus. Các phép đo dao động cắt biên độ nhỏ được sử dụng để xác định các tính chất lưu biến như mô đun tích trữ (G') và mô đun tiêu tán (G'') ở tốc độ cắt thấp mà không làm thay đổi cấu trúc mẫu, giúp hiểu rõ hơn các tính chất đàn hồi nhớt. Những đặc tính này cũng có thể được dùng để đánh giá độ ổn định lâu dài của sản phẩm [7].

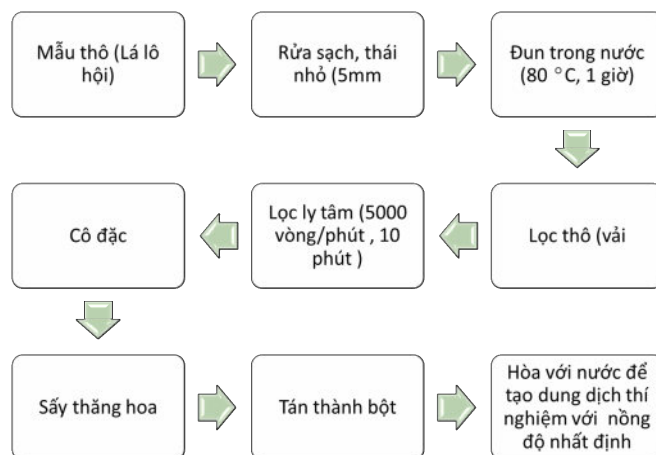
Mục tiêu của nghiên cứu này là khảo sát các đặc tính lưu biến của dịch nhầy chiết xuất từ lô hội bằng các phép đo lưu biến cắt sử dụng máy đo lưu biến dạng quay. Đồng thời, dữ liệu thực nghiệm được hồi quy theo một số mô hình lưu biến để tìm ra mô hình phù hợp mô tả đặc tính lưu biến cắt của dịch nhầy lô hội.

2. CÁC VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Vật liệu và chiết xuất dịch nhầy

Lô hội hay nha đam (*Aloe vera*) được mua ở chợ dân sinh. Quy trình chiết xuất chất nhầy được chuẩn hóa như sau: Nguyên liệu thô được rửa sạch, cắt nhỏ và đun nóng trong nước cất ở 80 °C trong 1 giờ. Dịch chiết được lọc qua vải xô và ly tâm ở 5000 vòng/phút trong 10 phút (Kubota 3700, Japan). Phần dịch nổi được thu thập, cô đặc bằng bay hơi quay (N-1300S, Tokyo Rikakikai, Nhật Bản) và sấy thăng hoa để bảo quản (Freeze dryer RL-BC series, Kyowac Corp.). Để chuẩn bị dung dịch cho các thí nghiệm, vật liệu thu được sau khi sấy sẽ được tán dạng bột, tùy theo yêu cầu

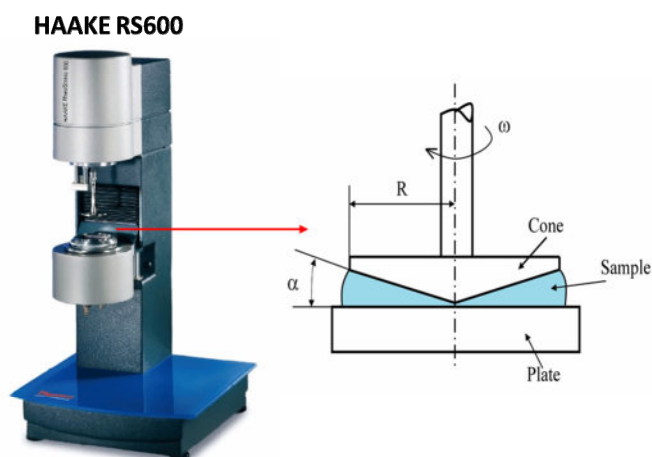
mà được hòa với nước với các tỷ lệ khác nhau. Trong nghiên cứu này, sẽ trộn 4 gram bột với 100 gram nước để tạo thành dung dịch thí nghiệm 4%. Dung dịch được trộn bằng cách sử dụng máy khuấy từ (MH520, Yamato Scientific) trong thời gian 1 giờ để đạt được sự đồng nhất. Trong khuôn khổ của nghiên cứu này, tác giả chỉ khảo sát đặc tính lưu biến của dịch nhầy lô hội có nồng độ 4% ở nhiệt độ 25 °C.



Hình 1. Quy trình chiết xuất chất nhầy từ cây lô hội (Aloe-vera)

2.2. Đo các thông số lưu biến

Các phép đo độ nhớt cắt được thực hiện bằng máy đo lưu biến dạng quay (HAAKE RS600, Thermo Fisher Scientific) được trang bị cảm biến dạng nón - tấm phẳng (đường kính 60 mm, góc nón 1°, khoảng cách giữa nón và tấm được thiết lập là 52 μm). Thí nghiệm đo được thực hiện ở nhiệt độ 25 °C trong dải tốc độ cắt từ 1 đến 100 s^{-1} . Tất cả các phép đo được tiến hành ba lần để đảm bảo độ lặp lại. Các thử nghiệm dao động được sử dụng để đo độ lớn của mô đun tích trữ (G') và mô đun tiêu tán (G'') trong khoảng tần số góc từ 1 rad/s đến 50 rad/s, với biên độ biến dạng 1%. Tất cả các phép đo được tiến hành ba lần để đảm bảo độ lặp lại. Kết quả được báo cáo là giá trị trung bình $\pm$ độ lệch chuẩn ($M \pm SD$) của ba lần lặp lại. $p < 0,05$ được coi là có ý nghĩa thống kê.



Hình 2. Thiết bị đo lưu biến dạng quay

2.3. Mô hình lưu biến

• Mô hình Carreau-Yasuda

Mô hình Carreau-Yasuda là một mô hình độ nhớt tổng quát được sử dụng để mô tả ứng xử giảm độ nhớt theo tốc độ cắt (shear-thinning behavior) của các chất lỏng phi Newton trong một dải tốc độ cắt rộng. Mô hình này đặc biệt hiệu quả trong việc mô tả sự chuyển tiếp dần dần giữa vùng độ nhớt Newton và vùng tuân theo định luật lũy thừa ở các chất lỏng phức tạp như dung dịch chất nhầy, thường biểu hiện tính giả dẻo do sự vướng víu và định hướng của các chuỗi polyme.

Mô hình Carreau–Yasuda được biểu diễn bằng phương trình:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right)^{\frac{n-1}{a}} \quad (1)$$

trong đó: $\eta(\dot{\gamma})$: độ nhớt phụ thuộc tốc độ cắt, η_0 : độ nhớt ở tốc độ cắt rất thấp (tốc độ cắt bằng không zero-shear viscosity), η_{∞} : độ nhớt ở tốc độ cắt rất cao (infinite-shear viscosity), λ : thời gian thư giãn (liên quan đến quá trình chuyển tiếp), a : chỉ số Yasuda điều chỉnh độ dốc của vùng chuyển tiếp, n : chỉ số dòng (power-law index), xác định mức độ shear-thinning, $\dot{\gamma}$: tốc độ cắt.

Mô hình Carreau–Yasuda cho phép mô phỏng chính xác ứng xử lưu biến của các hệ polyme phức tạp như chất nhầy từ thực vật, tảo, hoặc thực phẩm nhớt.

- **Mô hình Power law**

Mô hình Power-law được sử dụng rộng rãi để mô tả hành vi shear-thinning hoặc shear-thickening của chất lỏng phi Newton trong phạm vi tốc độ cắt trung bình. Mô hình được biểu diễn bởi phương trình:

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

hoặc:

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

trong đó: $\eta(\dot{\gamma})$: độ nhớt phụ thuộc tốc độ cắt, σ : ứng suất cắt, $\dot{\gamma}$: tốc độ cắt, K : Hệ số nhất quán (consistency index) (Pa.s^n), n : chỉ số dòng chảy (flow behavior index). $n < 1$: shear-thinning (giảm độ nhớt theo tốc độ cắt); $n = 1$: chất lỏng Newton; $n > 1$: shear-thickening (tăng độ nhớt theo tốc độ cắt).

- **Mô hình Giesekus**

Mô hình Giesekus xuất phát từ phương trình tensor ứng suất. Mô hình này có thể mô tả chính xác thể hiện của tham số dị hướng (α) và thời gian thư giãn (λ) trong dòng cắt. Độ nhớt biểu kiến theo mô hình Giesekus được xác định như sau [8]:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_p}{2\lambda^2 \dot{\gamma}^2} \left(\sqrt{1 + 4(1 - \alpha)\lambda^2 \dot{\gamma}^2} - 1 \right) + \eta_s \quad (4)$$

trong đó: η_p : độ nhớt polyme, η_s : độ nhớt dung môi, λ : thời gian thư giãn, α : tham số dị hướng.

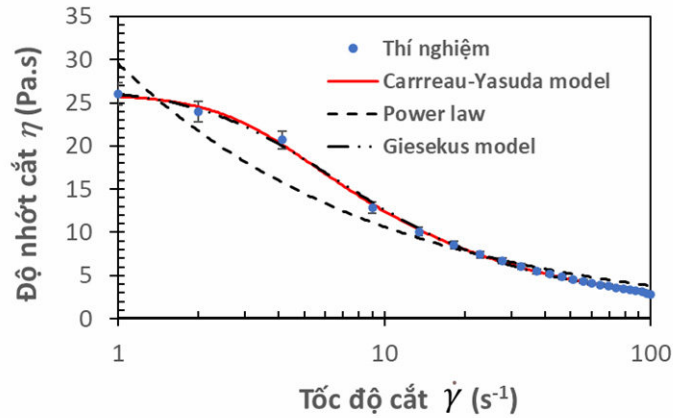
Công thức (4) mô tả sự chuyển tiếp từ plateau Newtonian $\eta_0 = (\eta_p + \eta_s)$ sang shear-thinning. Khi $\alpha = 0$, mô hình trở thành Maxwell (không có shear-thinning) và khi $\alpha > 0$, shear-thinning xuất hiện.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ nhớt cắt của dịch nhầy chiết xuất từ cây lô hội

Độ nhớt cắt của mẫu chất nhầy chiết xuất từ cây lô hội (Aloe-vera) được khảo sát trong khoảng tốc độ cắt từ 1 đến 100 s^{-1} . Độ sai lệch trung bình của số liệu thí nghiệm được ước lượng trong khoảng 5%, cho thấy tính tin cậy chấp nhận được của dữ liệu. Kết quả cho thấy chất nhầy lô hội thể hiện tính shear-thinning trong khoảng tốc độ cắt khảo sát (Hình 3). Tại tốc độ cắt thấp, độ nhớt đạt giá trị khoảng 20–33 Pa.s , sau đó giảm nhanh khi tốc độ cắt tăng, và tiệm cận về 3 Pa.s ở tốc độ cắt cao (100 s^{-1}). Điều này phản ánh sự phá vỡ cấu trúc mạng lưới polysaccharide (chủ yếu là acemannan) dưới tác động cắt, làm giảm lực cản dòng chảy.

Dữ liệu thực nghiệm về độ nhớt thu được trong dải tốc độ cắt từ 1–100 s^{-1} đã được hiệu chỉnh theo mô hình Carreau–Yasuda bằng phương pháp hồi quy phi tuyến. Các tham số của mô hình được liệt kê trong bảng 1. Kết quả khớp mô hình cho thấy, dịch nhầy lô hội có độ nhớt tại ứng suất cắt rất thấp $\eta_0 = 25,97 \text{ Pa.s}$ và độ nhớt tại tốc độ cắt lớn vô cùng rất nhỏ $\eta_{\infty} = 0,466 \text{ Pa.s}$, điều này phù hợp với đặc tính shear-thinning mạnh.



Hình 3. Độ nhớt cắt của chất nhầy chiết xuất từ cây lô hội

Giá trị tham số Yasuda a cao cho thấy quá trình chuyển tiếp từ độ nhớt cao sang thấp xảy ra rất nhanh khi tốc độ cắt tăng. Chỉ số dòng chảy $n < 1$ thể hiện đặc tính shear-thinning mạnh của mẫu thí nghiệm. Hình 3 cũng cho thấy đường cong mô phỏng bằng mô hình này khớp rất tốt với dữ liệu thực nghiệm trên toàn dải tốc độ cắt ($R^2 > 0.99$), với độ sai lệch nhỏ nhất tại vùng chuyển tiếp ($\dot{\gamma} \approx 10\text{--}30 \text{ s}^{-1}$). Khi hồi quy dữ liệu thí nghiệm bằng mô hình Power law thể hiện khá tốt xu hướng shear-thinning tại vùng tốc độ cắt trung bình – cao ($R^2 > 0.954$), tuy nhiên nó không thể mô tả độ nhớt rất cao ở tốc độ cắt thấp η_0 , do không chứa tham số độ nhớt giới hạn.

Ngoài ra, mô hình Giesekus cũng được sử dụng để xem xét đến tính đàn hồi nhớt của dịch nhầy chiết xuất từ cây lô hội. Hồi quy bằng mô hình Giesekus cho kết quả khá tốt ($R^2 > 0,985$), với thời gian thư giãn $\lambda \approx 0,2 \text{ s}$ và tham số bất đối xứng α trong khoảng 0,2–0,5, chỉ ra mức độ tương tác phân tử và hiện tượng định hướng dưới dòng chảy. Trong mô hình Giesekus, đóng góp của polyme (η_p) và đóng góp của dung môi (η_s) được tách biệt, do đó mô hình có ý nghĩa vật lý tốt hơn khi sử dụng tham số đó để dự đoán ứng xử đàn hồi nhớt của nó (ví dụ ứng xử kéo giãn - extensional behavior).

Bảng 1. Các tham số mô hình cho dịch nhầy chiết xuất từ cây lô hội

Tham số	Ý nghĩa	Carreau-Yasuda	Power law	Giesekus
η_0	Độ nhớt tại tốc độ cắt gần bằng 0 (Pa.s)	25,97	-	-
η_∞	Độ nhớt tại tốc độ cắt lớn (Pa.s)	0,466	-	-
λ	Hằng số thư giãn (relaxation time) (s)	0,301	-	0,3
n	Chỉ số shear-thinning	0,326	0,557	-
a	Tham số Yasuda (cố định)	2,68	-	-
K	Hệ số nhất quán (consistency index) (Pa.s ⁿ)	-	29,55	-
η_p	Độ nhớt polyme (Pa.s)	-	-	20
η_s	Độ nhớt dung môi (Pa.s)	-	-	5
α	Tham số dị hướng	-	-	0,2

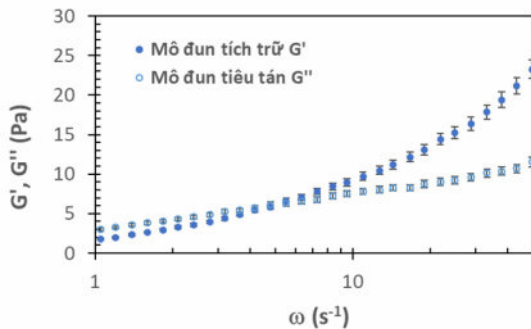
Khi so sánh với các loại dịch nhầy thực vật khác, dịch nhầy lô hội có độ nhớt và tính đàn hồi ở mức trung bình. Cụ thể, dịch nhầy đậu bắp (*Abelmoschus esculentus*) [9] và dịch nhầy rau dền (*Corchorus olitorius*) [10] thường có độ nhớt ở trạng thái chảy chậm cao hơn nhiều ($\eta_0 > 50 \text{ Pa.s}$) và chỉ số dòng chảy thấp hơn ($n \approx 0,3\text{--}0,4$), cho thấy khả năng shear-thinning mạnh mẽ hơn so với lô hội ($n \approx 0,55\text{--}0,6$). Dịch nhầy chiết xuất từ củ mài (*Dioscorea* spp.) cũng thể hiện mức shear-thinning tương tự nhưng có thời gian thư giãn dài hơn ($\lambda \approx 0,5\text{--}1,5 \text{ s}$), phản ánh tính đàn hồi rõ rệt hơn [11]. Các hệ giàu polysaccharide như guar gum hoặc psyllium thường có độ nhớt cao hơn một bậc so với lô hội và thể hiện tính đàn hồi mạnh hơn, thường được mô tả tốt hơn bởi các mô hình

Carreau–Yasuda hoặc Giesekus [3,12]. Trong khi đó, nhầy hạt chia (*Salvia hispanica*) thường tạo gel ngay ở nồng độ thấp, biểu hiện dạng plateau trong mô đun đàn hồi, khác biệt với lô hội vốn vẫn duy trì tính chất lỏng ở hầu hết dải tần số [3,12].

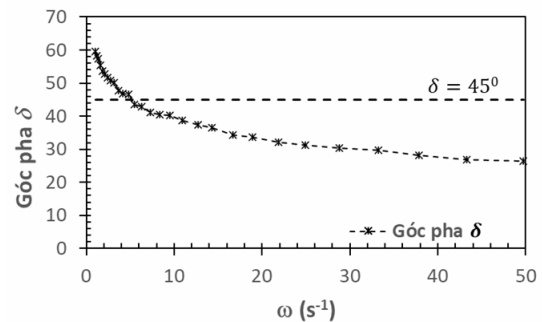
3.2. Các đặc tính đàn hồi nhớt

Các phép đo dao động cắt biên độ nhỏ (Small Amplitude Oscillations – SAOs) của dịch nhầy lô hội, thể hiện trong Hình 4 và Hình 5, cho thấy rõ tính chất đàn hồi–nhớt của vật liệu này. Trong khoảng vận tốc góc khảo sát ($1\text{--}50\text{ s}^{-1}$), độ sai lệch trung bình của số liệu thí nghiệm trong khoảng dưới 5% (giá trị $p < 0,05$). Trong phạm vi vận tốc góc khảo sát, cả mô đun tích trữ (G') và mô đun tiêu tán (G'') đều tăng theo vận tốc góc, phản ánh sự gia tăng độ cứng phụ thuộc vận tốc góc – một đặc trưng thường thấy ở các hệ keo polyme. Đáng chú ý, G' luôn lớn hơn G'' trong phần lớn miền tần số, đặc biệt từ trên 5 s^{-1} trở đi, cho thấy đặc tính đàn hồi chiếm ưu thế hơn hiện tượng tiêu tán nhớt.

Dấu hiệu của ứng xử đàn hồi–nhớt này được củng cố thêm thông qua góc pha δ (với $\tan \delta = (G'' / G')$) giảm dần khi vận tốc góc tăng, từ khoảng 60° tại vận tốc góc thấp xuống dưới 35° ở vận tốc góc cao hơn. Sự chuyển tiếp của δ xuống dưới ngưỡng 45° là một chỉ báo rõ ràng cho sự chuyển đổi về mặt lưu biến học từ phản ứng chi phối bởi nhớt sang phản ứng chi phối bởi đàn hồi, phù hợp với sự hình thành của các mạng polyme rồi tạm thời có khả năng lưu trữ năng lượng biến dạng hiệu quả hơn khi bị dao động nhanh.



Hình 4. Mô đun tích trữ G' và mô đun tiêu tán G'' của chất nhầy chiết xuất từ lô hội



Hình 5. Góc pha δ của các chất nhầy chiết xuất từ cây lô hội

Ứng xử này cho thấy dịch nhầy lô hội thuộc nhóm gel vật lý yếu, trong đó mô đun tích trữ phụ thuộc vào tần số nhưng vẫn chiếm ưu thế so với mô đun tiêu tán tại tần số vừa và cao. Chứng tỏ dịch nhầy lô hội có tính chất đàn hồi–nhớt giống gel, điển hình cho các hệ giàu polysaccharide với các vi cấu trúc có tổ chức đóng vai trò trong khả năng đàn hồi mạng.

Khi so sánh với các hệ dịch nhầy khác như đậu bắp (*Abelmoschus esculentus*), rau dền (*Corchorus olitorius*) và guar gum, dịch nhầy lô hội thể hiện độ bền gel ở mức trung bình. Chẳng hạn như: guar gum thường có $G' \gg G''$ với góc pha δ gần như không đổi dưới 30° , cho thấy cấu trúc đàn hồi mạnh hơn [12], trong khi dịch nhầy đậu bắp có thể cho thấy chế độ chi phối bởi G'' ở tần số thấp [13]. Ứng xử của lô hội, với $G' > G''$ và góc pha δ ở mức trung bình, cho thấy nó là một ma trận đàn hồi–nhớt có thể điều chỉnh, hứa hẹn ứng dụng trong các sản phẩm mỹ phẩm sinh học, dẫn thuốc, và gel thực phẩm sạch nhãn.

4. KẾT LUẬN

Các kết quả thu được từ phân tích lưu biến học cho thấy dịch nhầy lô hội thể hiện hành vi phi Newton đặc trưng, với tính cắt nhớt giảm (shear-thinning) rõ rệt. Mô hình Giesekus cho thấy khả năng mô tả chính xác đường cong độ nhớt theo tốc độ cắt với độ phù hợp cao ($R^2 > 0.985$), đồng thời cung cấp thông tin định lượng về ứng xử đàn hồi tại tốc độ cắt thấp và độ nhớt tiệm cận khi tốc độ cao. Các phép đo trượt dao động cũng khẳng định rằng tính đàn hồi chiếm ưu thế ở dải tần số vừa và cao, với mô đun tích trữ G' vượt trội so với mô đun tiêu tán G'' , đặc biệt khi tần số vượt quá 5 s^{-1} . Góc pha dao động δ giảm dần và ổn định dưới 45° , cho thấy mạng cấu trúc polysaccharide trong gel lô hội có khả năng lưu trữ năng lượng biến dạng – một đặc tính điển hình của gel yếu.

Trong tương lai, nghiên cứu về dịch nhầy lô hội có thể được mở rộng bằng cách khảo sát sự phụ thuộc của tính lưu biến theo nồng độ, bởi sự đan xen và tương tác phân tử polysaccharide được kỳ vọng sẽ làm thay đổi cả độ nhớt giới hạn và thời gian thư giãn. Đồng thời, biến đổi có hệ thống về nhiệt độ có thể cung cấp thêm hiểu biết về độ nhạy nhiệt và năng lượng hoạt hóa của dòng chảy, những yếu tố có ý nghĩa quan trọng trong chế biến cũng như ứng dụng sinh học. Ngoài ra, việc mở rộng khung mô hình để bao gồm các phương trình hiện định đàn nhớt khác (ví dụ: Phan Thien–Tanner, FENE-P hoặc các mô hình chất lỏng đàn hồi nhớt khác) có thể cho phép mô tả toàn diện hơn cả lưu biến cắt và lưu biến kéo dãn. Cuối cùng, các nghiên cứu so sánh giữa nhiều loại chất nhầy thực vật trong các điều kiện này sẽ góp phần làm sáng tỏ mối quan hệ cấu trúc – chức năng, từ đó định hướng ứng dụng trong lĩnh vực thực phẩm, dược phẩm và y sinh.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Saha D, Bhattacharya S. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review. *J Food Sci Technol* 2010;47:587–97. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0162-6>.
- [2] Ngwuluka NC, Ochekepe NA, Aruoma OI. Naturapolyceutics: The science of utilizing natural polymers for drug delivery. *Polymers (Basel)* 2014;6:1312–32. <https://doi.org/10.3390/polym6051312>.
- [3] BeMiller JN, Whistler RL, Barkalow DG, Chen CC. Aloe, Chia, Flaxseed, Okra, Psyllium Seed, Quince Seed, and Tamarind Gums. In L. W. R. Academic Press; 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092654-4.50013-9>.
- [4] Tanaka M, Yamada M, Toida T, Iwatsuki K. Safety evaluation of supercritical carbon dioxide extract of Aloe vera gel. *J Food Sci* 2012;77. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02452.x>.
- [5] Tai-Nin Chow J, Williamson DA, Yates KM, Goux WJ. Chemical characterization of the immunomodulating polysaccharide of Aloe vera L. *Carbohydr Res* 2005;340:1131–42. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.02.016>.
- [6] Lad VN, Murthy ZVP. Rheology of Aloe barbadensis Miller: A naturally available material of high therapeutic and nutrient value for food applications. *J Food Eng* 2013;115:279–84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.036>.
- [7] Alvarez MD, Canet W. Dynamic Viscoelastic Behavior of Vegetable-Based Infant Purees. *J Texture Stud* 2013;44:205–24. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12011>.
- [8] Torres MD, Hallmark B, Wilson DI, Hilliou L. Natural Giesekus fluids: Shear and extensional behavior of food gum solutions in the semidilute regime. *AIChE J* 2014;60:3902–15. <https://doi.org/10.1002/aic.14611>.
- [9] Yuan B, Ritzoulis C, Chen J. Extensional and shear rheology of a food hydrocolloid. *Food Hydrocoll* 2018;74:296–306. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.019>.
- [10] Yamazaki E, Kurita O, Matsumura Y. High viscosity of hydrocolloid from leaves of *Corchorus olitorius* L. *Food Hydrocoll* 2009;23:655–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.03.012>.
- [11] Minh NN. Rheological properties of yam mucilage. *Korea Aust Rheol J* 2023;35. <https://doi.org/10.1007/s13367-023-00071-0>.
- [12] Chen J. Food oral processing-A review. *Food Hydrocoll* 2009;23:1–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.11.013>.
- [13] Minh NN. Investigation and prediction the extensional viscosity of okra mucilage using Giesekus model. *Biorheology* 2022;59:14. <https://doi.org/DOI: 10.3233/BIR-220006>.

NGHIÊN CỨU ĐỒNG BỘ HAI XY LẠNH THỦY LỰC

Nguyễn Hữu Tuấn, Nguyễn Trọng Dũng

Trường Đại học Thủy lợi, email: nhtuan@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Nghiên cứu về đồng bộ hai xy lạnh thủy lực là một chủ đề quan trọng trong lĩnh vực điều khiển thủy lực, đặc biệt có ý nghĩa trong các ứng dụng công nghiệp như máy ép, cần trục, thiết bị nâng hạ và các hệ thống cơ khí phức tạp khác. Đảm bảo đồng bộ hoạt động của xy lạnh thủy lực không chỉ góp phần nâng cao độ chính xác chuyển động mà còn giảm thiểu biến dạng kết cấu, từ đó cải thiện hiệu suất và độ bền hệ thống.

Trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu tập trung vào việc đồng bộ hai hoặc nhiều cơ cấu chấp hành thông qua nhiều phương pháp khác nhau như điều khiển cơ học, điều khiển thủy lực và điều khiển điện - thủy lực. Trong đó, việc sử dụng tín hiệu phản hồi sai lệch vị trí để điều khiển lưu lượng qua bơm hoặc các van điều khiển lưu lượng, kết hợp với điều khiển áp suất được quan tâm nghiên cứu nhiều [1]. Tuy nhiên, độ chính xác và mức độ sai lệch tùy thuộc vào thông số kỹ thuật thiết bị và phương pháp thực hiện khác nhau [2]. Để khắc phục những hạn chế này, các nghiên cứu gần đây đã sử dụng van servo có khả năng điều chỉnh theo các yếu tố nhiễu bên ngoài nhằm nâng cao tính ổn định và chính xác của hệ thống [3].

Nghiên cứu trên hệ thống máy đập có nhiều cơ cấu chấp hành cho thấy sai số giữa các xy lạnh được duy trì trong phạm vi $\pm 0,1$ mm [4]. Trong khi đó, một nghiên cứu khác đã phân tích ảnh hưởng của các yếu tố phi tuyến, nhiễu bên ngoài và bố trí hình học của các xy lạnh đến hiệu quả đồng bộ [5]. Kết quả cho thấy, hệ thống điều khiển có thể đảm bảo sai số đồng bộ trong giới hạn cho phép, đồng thời hạn chế rung động và thay đổi đột ngột trong quá trình điều khiển.

Các nghiên cứu gần đây cũng tập trung vào ứng dụng van servo trong hệ thống thủy lực, nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng điều khiển vị trí của xy lạnh. Tùy thuộc vào cấu hình hệ thống và thuật toán điều khiển được sử dụng, mức độ ổn định và tuổi thọ vận hành của hệ thống có thể đạt được những cải thiện đáng kể [6]. Những nghiên cứu này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tối ưu hóa thiết kế và điều khiển để nâng cao hiệu suất của các hệ thống cơ khí-thủy lực...

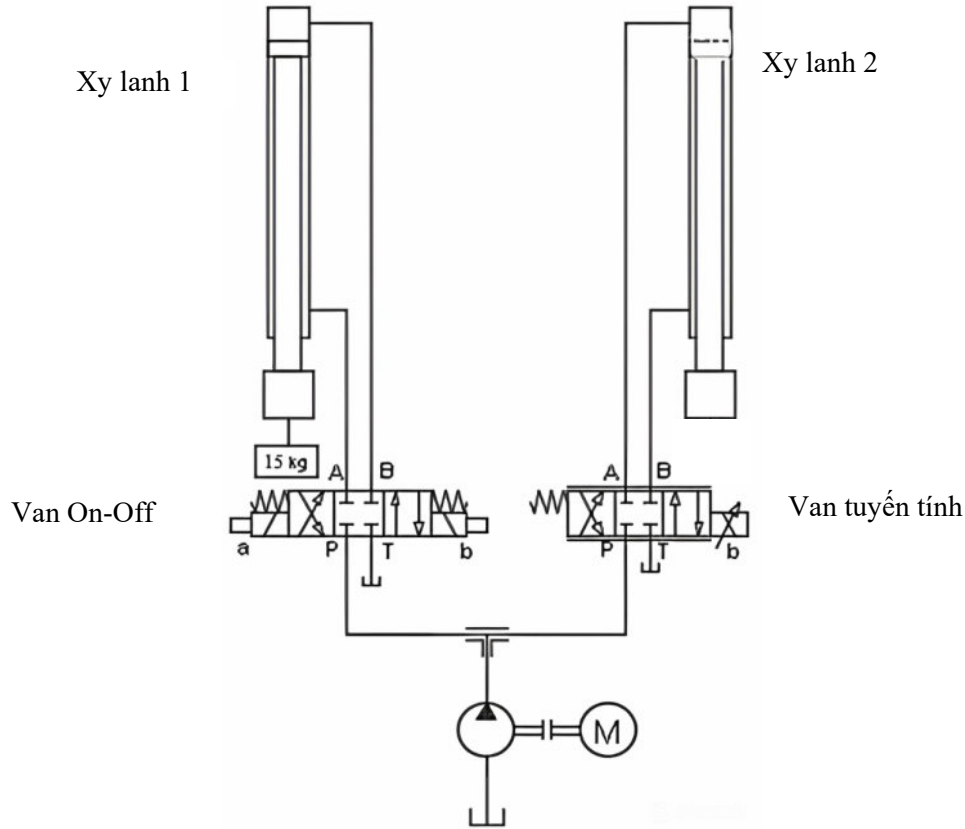
Trong thực tế, các thiết bị nâng hạ trên công trình thủy lợi, thủy điện đồng bộ bằng cách bố trí hai xy lạnh làm việc chịu tải giống nhau. Hệ thống đường ống, các van đặt đối xứng, giống nhau về khoảng cách từ nguồn đến xy lạnh dẫn đến tổn thất ma sát giống nhau. Khi đó ở điều kiện làm việc bình thường, hai xy lạnh sẽ làm việc đồng bộ [7]. Các nghiên cứu khi đó tập trung vào nâng cao hiệu suất làm việc của hệ thống và cải tiến hệ thống nhằm giảm kinh phí đầu tư bằng cách sử dụng cấu hình tiết kiệm năng lượng hoặc kết hợp giữa xy lạnh thủy lực và tời cáp khi đóng mở [8].

Bên cạnh các giải pháp đồng bộ nêu trên, đối với các thiết bị cơ khí có tải trọng, khẩu độ lớn trên công trình thủy lợi, thủy điện đã ứng dụng đồng bộ cơ học như sử dụng các van tiết lưu/van ổn tốc trên mỗi xy lạnh [9]; Áp dụng điều khiển truyền động bước trên cửa van cổng dẫn dòng [10]; Giới thiệu kết quả nghiên cứu một số giải pháp đồng tốc cho các cặp xy lạnh song hành, mô phỏng trên máy tính; kết quả tính toán, thiết kế hệ thống thủy lực nâng hạ van cung của công trình thủy điện Za Hưng [11].

Trong những năm gần đây, xu hướng nghiên cứu đồng bộ nhiều cơ cấu chấp hành đã có sự chuyển đổi với việc áp dụng các cấu hình/phần tử van thủy lực – điện dạng ON – OFF trong hệ thống điều khiển, nhằm nâng cao hiệu quả và đơn giản hóa cấu hình điều khiển [12].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu thực nghiệm được thực hiện trên hệ thống với cơ cấu chấp hành gồm hai xy lanh tác động hai chiều có cần một phía. Để đánh giá khả năng đồng bộ hoạt động của hệ thống, giả thiết được đặt ra là hai xy lanh sẽ chịu tải trọng khác nhau nhằm tạo ra điều kiện làm việc không cân bằng. Cụ thể, tải trọng ở xy lanh 1 là 15kg, xy lanh số 2 không mang tải (Hình 1). Sự chênh lệch tải trọng này sẽ gây ra sự khác biệt về tốc độ của hai xy lanh, từ đó tạo phát sinh sai lệch chuyển động. Kết quả này được dùng để phân tích, đánh giá hiệu quả của hệ thống đồng bộ trong điều kiện tải không đối xứng. Thông số kỹ thuật hệ thống thủy lực được thể hiện trong Bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống thủy lực

Bảng 1. Thông số kỹ thuật hệ thống thủy lực

STT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Trạm nguồn và các phần tử		Rexroth
2	Công suất động cơ	kW	2,2
3	Lưu lượng bơm	lít/phút	16
4	Đường kính piston	mm	25
5	Đường kính cần piston	mm	16
6	Hành trình	mm	200
7	Đường kính ống hút	mm	8
8	Đường kính ống đẩy	mm	6
9	Áp suất max	bar	50

Hệ thống điều khiển được xây dựng trên nền tảng Arduino - một nền tảng mã nguồn mở phổ biến trong lập trình và điều khiển vi điều khiển. Phần mềm Arduino IDE (Integrated Development Environment) được sử dụng làm công cụ chính để viết mã, biên dịch và nạp chương trình vào bo mạch Arduino Mega 2560.

Nguồn cung cấp năng lượng cho hệ thống phải đảm bảo cung cấp điện áp và dòng điện ổn định cho toàn bộ thiết bị. Cụ thể, hệ thống sử dụng nguồn 24VDC để cấp cho hai van thủy lực và nguồn 5VDC cung cấp cho mạch Arduino. Việc tách nguồn điện giúp đảm bảo hoạt động ổn định và tránh nhiễu tín hiệu trong quá trình điều khiển. Thông số kỹ thuật hệ thống điều khiển được thể hiện trong bảng 2.

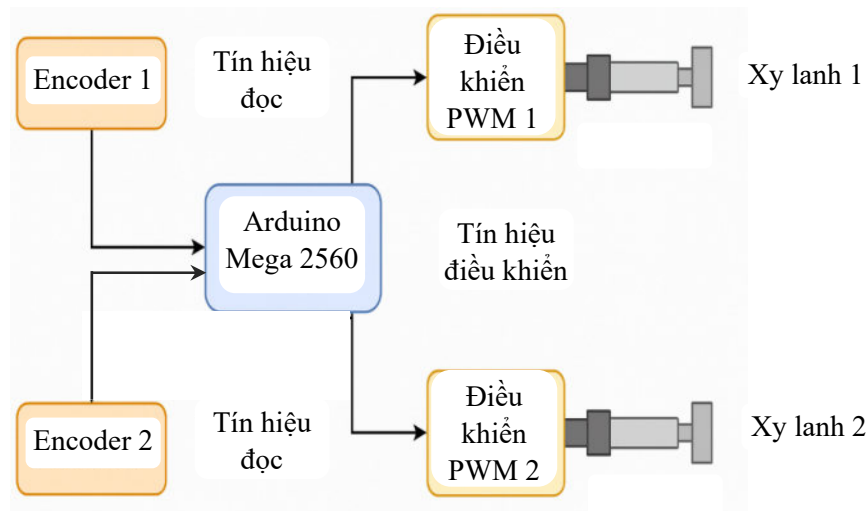
Mạch cầu H được áp dụng để điều khiển hướng và tốc độ của xy lanh. Mạch cầu H bao gồm bốn công tắc dạng MOSFET hoặc tương đương, cho phép điều khiển chiều dòng điện trong động cơ một chiều hoặc xy lanh thông qua các tín hiệu đầu vào từ Arduino. Cơ chế này cho phép thay đổi hướng chuyển động và điều chỉnh vận tốc xy lanh một cách linh hoạt và chính xác.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật hệ thống điều khiển

STT	Thông số	Đơn vị	Giá trị	Ghi chú
A	Arduino Mega 2560			
1	Vi điều khiển		Atmega2560	
2	Điện áp hoạt động	VDC	5	
3	Điện áp đầu vào	VDC	6-20	
4	Số chân digital I/O		54	
5	Số chân analog input		16	
6	Dòng điện DC trên mỗi chân I/O	mA	40	
7	Dòng điện DC trên chân 3.3V	mA	50	
8	Tốc độ xung nhịp	mHz	16	
B	Encode			
1	Loại kết nối		Loại cấp hướng tâm	
2	Momen khởi động	Nm	0,00392	
3	Tần số tối đa	kHz	300	
4	Đường kính trục	mm	8	

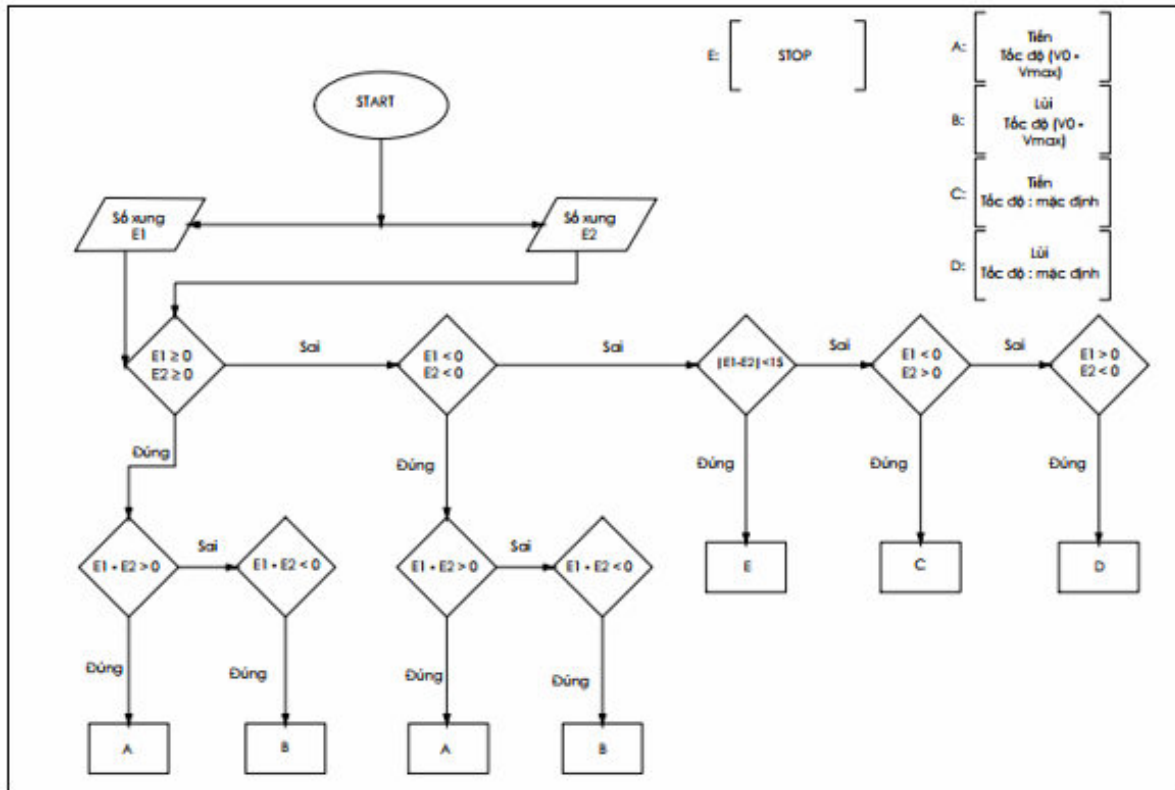
Arduino Mega 2560 được sử dụng làm vi điều khiển trung tâm trong hệ thống điều khiển. Thiết bị này đảm nhận vai trò nhận các tín hiệu đầu vào, tiến hành xử lý và điều phối các tín hiệu điều khiển đến các thiết bị đầu ra như mạch cầu H và xy lanh thủy lực. Với số lượng chân GPIO (General Purpose Input/Output) đa dạng cùng khả năng xử lý đa nhiệm, Arduino Mega 2560 cho phép đồng thời điều khiển hai xy lanh và thu nhận dữ liệu từ các cảm biến, bao gồm Encoder hoặc công tắc hành trình, đảm bảo tính linh hoạt và chính xác trong quá trình vận hành của hệ thống.

Mô hình hóa thuật toán điều khiển.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý điều khiển

Mô hình điều khiển được xây dựng dựa trên việc sử dụng tín hiệu đầu vào từ hai cảm biến với Encoder gắn trên hai xy lanh (Hình 2). Tại vi điều khiển Arduino, tín hiệu từ hai Encoder được tiếp nhận và xử lý để đo vị trí chính xác của từng xy lanh. Hệ thống thực hiện so sánh số xung tín hiệu giữa hai Encoder nhằm xác định sai lệch vị trí giữa hai xy lanh, từ đó điều khiển hoạt động của các xy lanh thông qua van thủy lực. Giải thuật điều khiển được thể hiện trong lưu đồ (Hình 3).



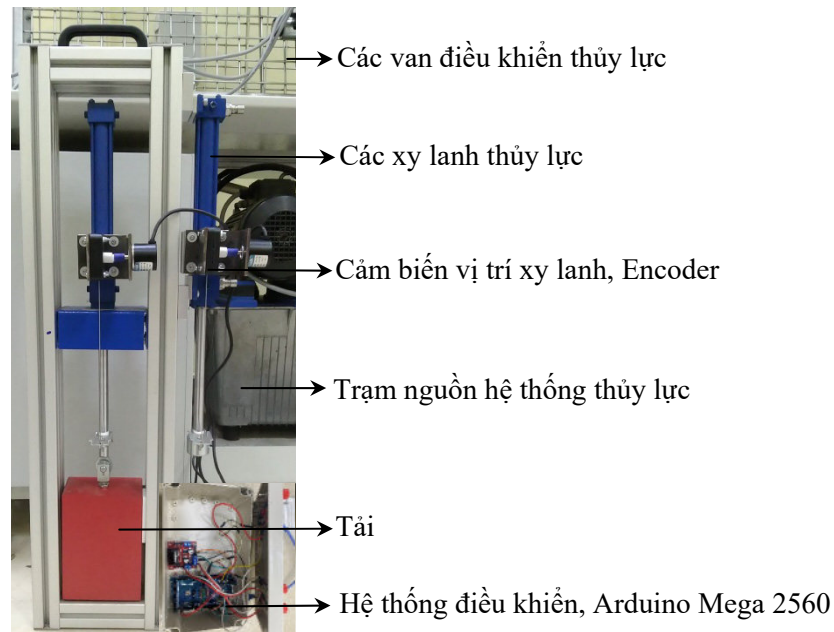
Hình 3. Lưu đồ thuật toán điều khiển

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

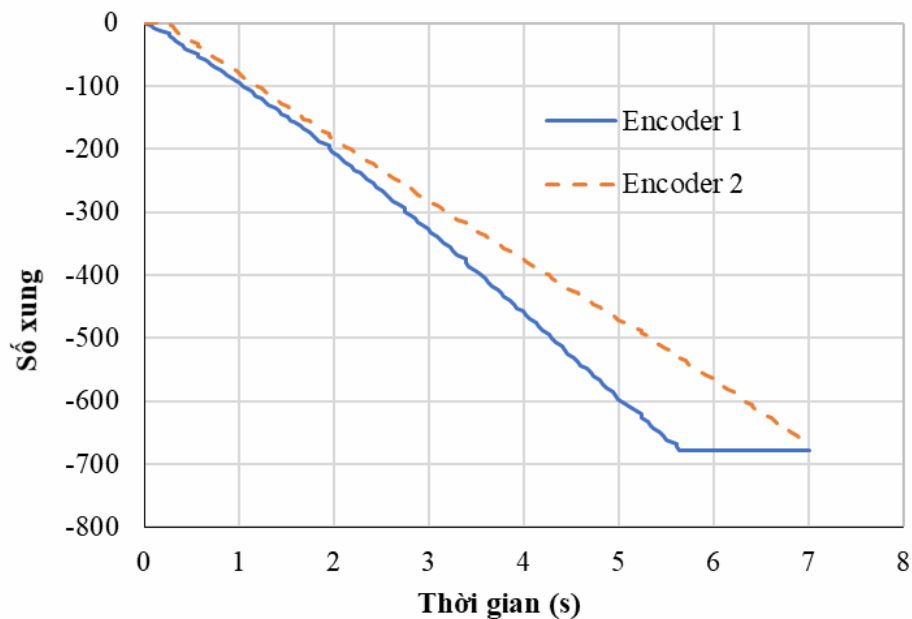
Hệ thống thử nghiệm được cấu hình gồm bộ vi điều khiển Arduino kết nối với hai cảm biến Encoder gắn trên cơ cấu xy lanh. Ban đầu, Arduino thực hiện khởi tạo các chân điều khiển và thiết lập ngắt ngoài (external interrupt) để ghi nhận các xung tín hiệu từ hai Encoder theo cạnh lên (RISING edge). Trong quá trình vận hành, khi xy lanh chuyển động, hai Encoder sẽ ghi lại số xung tương ứng phản ánh vị trí thực tế của từng xy lanh (Hình 3).

Việc đọc và so sánh liên tục số xung từ Encoder 1 và Encoder 2 nhằm xác định sai lệch vị trí giữa hai cơ cấu chấp hành. Lựa chọn ngưỡng điều khiển khi sai lệch giữa hai xy lanh là 15 xung do trong quá trình thực nghiệm giá trị này đảm bảo hiệu quả điều khiển/phản hồi phù hợp với thiết bị hiện có tại phòng thí nghiệm. Khi sai lệch số xung nhỏ hơn hoặc bằng 15 xung, hệ thống sẽ phát lệnh dừng điều khiển hai xy lanh bằng cách ngắt tín hiệu điều khiển van tuyến tính, cụ thể là thiết lập mức điện áp LOW tại hai chân điều khiển A_{out} và B_{out}. Ngược lại, nếu sai lệch vượt quá ngưỡng 15 xung, hệ thống sẽ xác định và điều chỉnh hướng di chuyển thích hợp. Nếu số xung của Encoder 1 lớn hơn encoder 2 tức là xy lanh 1 đang chạy nhanh hơn xy lanh 2 thì hệ thống xuất tín hiệu điều khiển tăng điện áp của van tuyến tính lên một lượng thích hợp được đặt sẵn qua thử nghiệm làm xy lanh 2 đuổi theo xy lanh 1 tới khi đồng bộ vị trí thì dừng điều khiển và ngược lại đối với trường hợp số xung của Encoder 1 nhỏ hơn Encoder 2, van tuyến tính sẽ được giảm điện áp.

Tốc độ chuyển động của xy lanh được điều chỉnh thông qua tín hiệu điều khiển độ rộng xung (PWM), dựa trên mức chênh lệch số xung và được giới hạn trong phạm vi tốc độ an toàn nhằm đảm bảo chuyển động ổn định và chính xác. Toàn bộ dữ liệu gồm số xung của từng Encoder và giá trị tín hiệu PWM đồng thời được truyền ra màn hình Serial Monitor để giám sát và phân tích trong suốt quá trình thử nghiệm.



Hình 3. Bố trí thiết bị thử nghiệm



Hình 4. Kết quả thử nghiệm

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống điều khiển xy lanh sử dụng tín hiệu từ hai Encoder vận hành ổn định và đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật đề ra. Sai lệch trung bình 60,2 xung, tương ứng 8,9% và 17,6mm hành trình giữa hai xy lanh. Biểu đồ kết quả cho thấy tốc độ dịch chuyển của xy lanh có tính tuyến tính tương đối theo thời gian. Ở đầu quá trình hệ thống đã phát hiện và phản hồi kịp thời bằng cách dừng hoặc điều chỉnh hướng di chuyển của xy lanh, sự sai lệch tăng lên khi về cuối hành trình. Điều này có thể giải thích do độ trễ xử lý của cảm biến Encoder và phản hồi độ trễ tín hiệu của vi điều khiển Arduino (Hình 4). Để giảm các sai lệch này, có thể sử dụng thiết bị có độ chính xác cao hơn hoặc các thiết bị vi điều khiển như Raspberry Pi, PLC...

Hệ thống bước đầu đã đạt được mục tiêu điều khiển theo vị trí và tốc độ của xy lanh. Thiết bị đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật và tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống công nghiệp thực tế, trong đó có thể tiếp tục hoàn thiện bằng cách cải thiện khả năng xử lý và tối ưu hóa thuật toán điều khiển để nâng cao hiệu suất vận hành. Mặc dù kết quả còn hạn chế so với các nghiên cứu đã công bố về tốc độ xử lý của các thiết bị và sai lệch giữa hai xy lanh.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về hệ thống đồng bộ điều khiển hai xy lanh thủy lực sử dụng vi điều khiển Arduino Mega 2560 kết hợp với tín hiệu đầu vào từ hai cảm biến Encoder. Thuật toán điều khiển dựa trên so sánh số xung tín hiệu encoder nhằm xác định sai lệch vị trí giữa hai xy lanh, từ đó điều chỉnh hướng và tốc độ thông qua tín hiệu PWM điều khiển mạch cầu H.

Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, độ sai lệch trung bình vị trí giữa hai xy lanh 17,6mm (8,9%), đồng thời tốc độ dịch chuyển có đặc tính gần tuyến tính theo thời gian. Hệ thống phản hồi nhanh khi sai lệch vượt quá ngưỡng cho phép với khả năng dừng hoặc điều chỉnh hướng di chuyển kịp thời, góp phần đảm bảo an toàn và chính xác trong vận hành.

Như vậy, hệ thống điều khiển đã đáp ứng các yêu cầu về đồng bộ vị trí và điều khiển tốc độ của hai xy lanh thủy lực, có tiềm năng ứng dụng thực tiễn trong các lĩnh vực công nghiệp cần độ chính xác và ổn định cao. Nghiên cứu mở ra hướng phát triển tiếp theo nhằm hoàn thiện hơn về độ chính xác thiết bị, chống nhiễu và tối ưu thuật toán nhằm nâng cao hiệu suất và tính tin cậy của hệ thống trong môi trường vận hành phức tạp.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ trường Đại học Thủy lợi trong đề tài mã số CS2025-5. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã tài trợ kinh phí thực hiện đề tài.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D Antić, V Nikolić, M Mihajlov, K Aleksić, (2001), "Sliding Mode Control with Fuzzy Tuning for Position Tracking of an Electro-Hydraulic Actuator", Proceedings of the seventh international SAUM conference, Vrnjačka Banja, Yugoslavia, pp 41-46.
- [2] Bin Yao and M Tomizuka, "Adaptive Robust Control of MIMO Nonlinear Systems in Semi-Strict-Feedback Forms", submitted to Automatica (revised in July 1999 and conditionally accepted in 2000).
- [3] A Bonchis, P.I Corke, D.C Rye, and Q.P Ha, (2001), "Variable structure methods in hydraulic servo systems control", Automatica, vol 37, pp 589-595.
- [4] Chungeng Sun, Ruibo Yuan (2021), Adaptive robust cross-coupling position synchronization control of a hydraulic press slider-leveling, Science progress, 2021, Vol. 104(1) 1-19.
- [5] Bingwei Gao et al (2024), Research on position synchronization control strategy of double hydraulic cylinders based on cross-coupling, Technical paper, Volume 46, article number 550.
- [6] Lizhen, L et al (2024). Research on synchronous control of double-cylinder electro-hydraulic position servo system based on active disturbance rejection control. In: Proceedings of the 12th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications. RoViSP 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1123. Springer, Singapore.
- [7] Nguyễn Thị Việt Ánh, Nguyễn Hữu Tuấn (2011); Nghiên cứu cải tiến hệ thống thủy lực đóng mở cửa cung tràn xả lũ của hồ chứa nước Cửa Đạt; Tạp chí khoa học thủy lợi và môi trường; Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, Số 34 (9/2011) ISSN 1859 - 3941, pp 129-133.
- [8] Nguyễn Hữu Tuấn (2009). Nghiên cứu so sánh ảnh hưởng của cấu hình đến hiệu suất của hệ thống thủy lực nâng hạ cửa van; Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường; Số đặc biệt kỷ niệm 50 năm thành lập Trường ĐHTL 2009, pp 259-263.
- [9] Lý Thanh Hà, Nguyễn Khoa Nguyên (2005); Ứng dụng xy lanh thủy lực trong các công trình thủy lợi và thủy điện; Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, kỳ 2, 4/2005.
- [10] Ngô Sỹ Lộc, Lý Thanh Hà, Lê Văn An, Đỗ Mạnh Cường (2006); Ứng dụng truyền động bước điều khiển đồng bộ cho máy nâng công dẫn dòng thủy điện Sơn La; Tạp chí Tài nguyên nước, số 3, 2006.
- [11] Nguyễn Chí Cường, Trần Chí Trung, Nguyễn Anh Tuấn, Vũ Thanh Bình (2010); Nghiên cứu tính toán và thiết kế hệ thống thủy lực đáp ứng đồng tốc hai xy lanh nâng hạ van cung trong các công trình thủy điện, viện nghiên cứu cơ khí, Bộ Công thương.
- [12] Trần Xuân Bộ (2024); Nghiên cứu điều khiển đồng bộ chuyển động nhiều cơ cấu chấp hành thủy lực sử dụng các van điện - thủy lực dạng ON - OFF; Đại học Bách khoa Hà Nội, Bộ Giáo dục và Đào tạo.

NGHIÊN CỨU, TÍNH TOÁN THỜI GIAN BAY CHO FLYCAM CHỤP ẢNH DỰA TRÊN CÁC THÔNG SỐ CỦA HỆ THỐNG ĐẦY

Nguyễn Đăng Tấn

Trường Đại học Thủy lợi, email: nguyendangtan@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Flycam loại cánh quay, hay còn gọi là máy bay không người lái (UAV), đã trở thành một công cụ quan trọng trong lĩnh vực nông nghiệp hiện đại, mang lại những bước tiến vượt bậc trong quản lý sản xuất và bảo vệ cây trồng. Với khả năng bay lượn linh hoạt, tích hợp các công nghệ tiên tiến như camera đa phổ, cảm biến nhiệt và hệ thống định vị RTK, flycam hỗ trợ nông dân giám sát đồng ruộng một cách nhanh chóng và chính xác. Đặc biệt, nó đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện sớm sâu bệnh, đánh giá sức khỏe cây trồng qua chỉ số NDVI, lập bản đồ nông nghiệp, và tối ưu hóa việc sử dụng phân bón hoặc thuốc bảo vệ thực vật. Vai trò của flycam trong nông nghiệp không chỉ dừng lại ở việc thu thập dữ liệu mà còn giúp tiết kiệm thời gian, giảm chi phí lao động và tăng hiệu quả kinh tế. Ví dụ, vào thời điểm sáng sớm, khi nhiệt độ và ánh sáng lý tưởng, flycam có thể được triển khai để khảo sát diện tích lớn, hỗ trợ ra quyết định kịp thời trong mùa vụ [3]. Hơn nữa, với khả năng tích hợp dữ liệu vào các phần mềm phân tích, flycam góp phần thúc đẩy nông nghiệp thông minh, hướng tới phát triển bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu. Sự xuất hiện của các dòng flycam nông nghiệp đã khẳng định vai trò không thể thiếu của công nghệ này trong tương lai của ngành nông nghiệp [6].

Cánh quạt (propeller) là một trong những thành phần quan trọng nhất của flycam, ảnh hưởng trực tiếp đến lực đẩy, tốc độ và hiệu suất bay. Việc lựa chọn propeller phù hợp đòi hỏi cân nhắc các yếu tố như kích thước, độ nghiêng, số lượng cánh, chất liệu và sự tương thích với động cơ [5].

Động cơ điện quyết định khả năng nâng, tốc độ và độ linh hoạt. Việc lựa chọn động cơ điện cần dựa trên loại động cơ, KV rating, kích thước, công suất và sự tương thích với propeller. Động cơ không chổi than (brushless) hiện chủ yếu được sử dụng cho flycam. KV rating, biểu thị số vòng quay mỗi phút trên mỗi Volt, là yếu tố quan trọng. Động cơ có KV thấp (700-1000 KV) phù hợp với propeller lớn, tải nặng và bay ổn định, thường dùng cho flycam quay phim. Ngược lại, động cơ KV cao (1000-2500 KV) phù hợp với propeller nhỏ và tốc độ cao, lý tưởng cho flycam tốc độ cao [1].

Bộ điều khiển tốc độ điện tử (ESC) chịu trách nhiệm điều khiển tốc độ quay của động cơ, đảm bảo flycam hoạt động mượt mà và hiệu quả. Lựa chọn ESC cần xem xét dòng định mức, điện áp hỗ trợ, giao thức điều khiển, kích thước và các tính năng bổ sung.

Pin là nguồn cung cấp năng lượng cho toàn bộ hệ thống flycam, ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian bay và hiệu suất. Việc lựa chọn pin cần cân nhắc loại pin, điện áp, dung lượng, tỷ lệ xả, trọng lượng và thời gian bay. Pin LiPo (Lithium Polymer) là lựa chọn phổ biến nhất cho flycam nhờ mật độ năng lượng cao, trọng lượng nhẹ và tính linh hoạt. Điện áp pin được xác định bởi số cell (S), ví dụ 3S (11,1V), 4S (14,8V) hoặc 6S (22,2V). Điện áp cao hơn cung cấp công suất lớn hơn, phù hợp với động cơ KV thấp và propeller lớn, nhưng cần đảm bảo ESC và động cơ tương thích với số S của pin. Dung lượng pin (mAh) ảnh hưởng đến thời gian bay. Pin dung lượng lớn (3000-6000mAh) phù hợp cho flycam quay phim cần bay lâu, trong khi pin dung lượng nhỏ (1000-2000mAh) nhẹ hơn, lý tưởng cho fly tốc độ cao.

2. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN

Một trong những thành phần quan trọng nhất của máy bay nhiều cánh là hệ thống đẩy, quyết định các yêu cầu hiệu suất của máy bay nhiều cánh, chẳng hạn như khả năng treo lơ lửng, tốc độ, tải trọng và tầm bay. Hệ thống đẩy bao gồm cánh quạt, động cơ, Bộ điều khiển tốc độ điện tử (ESC) và pin. Các thành phần của hệ thống đẩy phải được phối hợp và tương thích với nhau [4].

2.1. Cánh quạt

Cánh quạt có bước cố định trong multicopter thường được sử dụng. Hiệu suất của cánh quạt phụ thuộc vào lực đẩy T (đơn vị: N) và mô-men xoắn M (đơn vị: N·m). Lực đẩy của mỗi động cơ dẫn động cánh quạt phụ thuộc vào khối lượng nâng của flycam.

$$T = \frac{G}{n_r} \quad (1)$$

trong đó: $G(N)$ là trọng lượng của flycam, n_r – là số lượng cánh quạt

Tốc độ quay của động cơ được xác định như sau:

$$n = 60 \sqrt{\frac{T}{\rho D_p^4 C_T}} \quad (2)$$

Mô men xoắn của cánh quạt được xác định:

$$M = C_M \rho \left(\frac{n}{60} \right)^2 D_p^5 \quad (3)$$

trong đó:

- n (đơn vị: vg/ph) biểu thị tốc độ cánh quạt.
- D_p (đơn vị: m) biểu thị đường kính của cánh quạt.
- Hệ số không thứ nguyên của lực đẩy C_T , hệ số mô men xoắn C_M thay đổi tùy thuộc vào biên dạng cánh quạt.
- Khối lượng riêng không khí ρ (đơn vị: kg/m³), thay đổi theo độ cao h (đơn vị: m) và nhiệt độ t_i (đơn vị: °C), được biểu diễn như sau:

$$\rho = \frac{273 P_a}{101325(273 + t_i)} \rho_0 \quad (4)$$

Trong đó mật độ không khí tiêu chuẩn $\rho_0 = 1,293 \text{ kg} / \text{m}^3$ (ở 0°C, 273 K). Áp suất khí quyển P_a (đơn vị: Pa) được tính như sau:

$$P_a = 101325 \left(1 - 0,00065 \frac{h}{273} + t_i \right)^{5,2561} \quad (5)$$

Trong quá trình làm việc, độ cao của flycam thay đổi theo yêu cầu nhiệm vụ. Do đó, h và t_i được coi là các hằng số trong đánh giá thời gian bay.

2.2. Động cơ điện

Các mô hình động cơ điện được sử dụng c hiện nay thường là động cơ DC không chổi than. Mô hình hóa động cơ nhằm mục đích xác định U_m (đơn vị: V) và I_m (đơn vị: A) từ tốc độ động cơ n (bằng với tốc độ cánh quạt), mô-men tải động cơ M (bằng với mô-men xoắn của cánh quạt). Các đại lượng này được biểu diễn dưới dạng các hàm như sau:

$$U_m = \left(\frac{MK_{V0}U_{m0}}{9,55(U_{m0} - I_{m0}R_m)} + I_{m0} \right) R_m + \frac{U_{m0} - I_{m0}R_m}{K_{V0}U_{m0}} n \quad (6)$$

$$I_m = \frac{MK_{V0}U_{m0}}{9,55(U_{m0} - I_{m0}R_m)} + I_{m0} \quad (7)$$

trong đó:

K_{v0} : Hệ số tốc độ động cơ (đơn vị: vg/ph/Volt), cho biết số vòng quay mỗi phút trên mỗi volt điện áp, thể hiện hiệu suất quay của động cơ (ví dụ: 500-2000 vg/ph/V).

I_{m0} : Dòng điện không tải danh định (đơn vị: A), dòng điện tiêu thụ khi động cơ quay không tải.

U_{m0} : Điện áp không tải danh định (đơn vị: V), điện áp cần thiết để động cơ quay ở tốc độ cơ bản.

R_m : Điện trở nội động cơ (đơn vị: Ω), ảnh hưởng đến tổn thất năng lượng và nhiệt độ.

U_m (đơn vị: V) là điện áp động cơ tương đương,

I_m (đơn vị: A) là dòng điện động cơ tương đương

2.3. Bộ điều khiển tốc độ điện tử (ESC)

Một ESC là thiết bị bên ngoài động cơ, thực hiện điện tử việc điều chỉnh đạt được cơ học trong động cơ có chổi than. ESC điều chỉnh tốc độ động cơ tùy thuộc vào tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển.

Tỷ lệ duty ESC được tính như sau (giá trị tỷ lệ, trong khoảng từ 0 đến 1, không thứ nguyên):

$$\sigma = \frac{U_m + I_m R_e}{U_b} \quad (8)$$

Dòng điện đầu vào của ESC được tính như sau:

$$I_e = \sigma I_m \quad (9)$$

Điện áp đầu vào của ESC được tính như sau:

$$U_e = U_b - I_b R_b \quad (10)$$

trong đó:

U_b : Điện áp tổng của pin (đơn vị: V),

I_b (đơn vị: A) biểu thị dòng điện pin

R_b (đơn vị: Ω) biểu thị điện trở pin

2.4. Pin

Mô hình pin chủ yếu nhằm mục đích xác định thời gian hoạt động T_b (đơn vị: phút). Quá trình xả pin được đơn giản hóa sao cho điện áp pin giữ nguyên và dung lượng pin giảm tuyến tính. Do đó, mô hình được tính như sau:

$$T_b = \frac{C_b - C_{min}}{I_b} \cdot \frac{60}{1000} \quad (11)$$

trong đó C_b (đơn vị: mAh) biểu thị dung lượng pin tối thiểu, được đặt theo biên an toàn. Thông thường, có thể được chọn từ $0,15C_b \div 0,2C_b$. Dòng điện pin I_b không được vượt quá dòng điện tối đa mà pin có thể chịu được, được biểu diễn bằng tốc độ xả tối đa K_b :

$$I_b \leq \frac{C_b K_b}{1000} \quad (12)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích thời gian bay phụ thuộc nhiệt độ, độ cao và khối lượng tổng máy bay

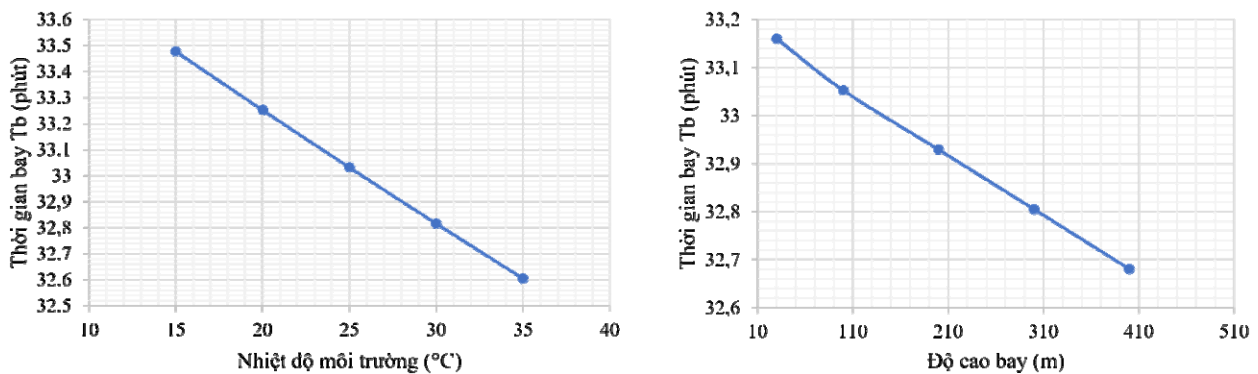
Mục này nhằm đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố môi trường (nhiệt độ, độ cao) và tải trọng (khối lượng tổng) đến thời gian bay thực tế của flycam, trong điều kiện loại pin đã được cố định. Việc phân tích giúp xác định giới hạn hoạt động an toàn và hiệu quả của hệ thống bay trong các điều kiện khác nhau, từ đó hỗ trợ lựa chọn cấu hình bay tối ưu. Thông số pin sử dụng trong ví dụ này là của flycam mavic 3 multispectral M3M (xem Bảng 1).

Hình 1 trình bày mối quan hệ giữa thời gian bay của flycam với hai yếu tố môi trường quan trọng: nhiệt độ không khí (biểu đồ bên trái) và độ cao bay so với mực nước biển (biểu đồ bên phải). Trong biểu đồ bên trái, trục hoành biểu diễn nhiệt độ môi trường ($^{\circ}\text{C}$) trong khoảng từ 15°C đến 35°C , còn trục tung biểu diễn thời gian bay trung bình của flycam (phút). Đường cong thể hiện rằng khi nhiệt độ tăng, thời gian bay của flycam có xu hướng giảm. Tuy nhiên, mức giảm này là nhỏ – chỉ vào khoảng 0,8 phút khi nhiệt độ tăng từ 15°C lên 35°C . Điều này có thể lý giải do hiệu suất của pin giảm nhẹ khi nhiệt độ tăng cao, làm ảnh hưởng đến tổng năng lượng cung cấp cho động cơ. Tương tự, biểu đồ bên phải thể hiện ảnh hưởng của độ cao bay, với độ cao dao động từ 10 m đến 450 m. Khi flycam bay ở độ cao lớn hơn, thời gian bay cũng có xu hướng giảm, nhưng mức giảm vẫn không đáng kể (chỉ khoảng 1,4 phút). Điều này có thể là do không khí loãng hơn ở độ cao lớn làm giảm hiệu suất nâng, buộc động cơ phải hoạt động mạnh hơn và tiêu tốn năng lượng nhanh hơn.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của pin sử dụng cho flycam mavic 3 multispectral M3M

Thành phần	Thông số sử dụng tính toán cho flycam mavic 3 multispectral M3M có khối lượng cất cánh tối đa 1,050 kg
Cánh quạt	$D_p \approx 9,4 \text{ inches}, C_T \approx 0,1, C_M \approx 0,007$
Động cơ điện	$K_{V0} \approx 1400(\frac{\text{vg}}{\text{ph}}) / V, R_m \approx 0,08\Omega, U_{m0} \approx 10V, I_{m0} \approx 0,8V$
ESC	$I_{eMax} \approx 30 \text{ A}, R_e \approx 0,008 \Omega$
Pin	$E = 77 \text{ Wh}, C_b = 5000\text{mAh}, U_b = 15,4V, R_b \approx 0,008\Omega, K_b \approx 25 - 30C$

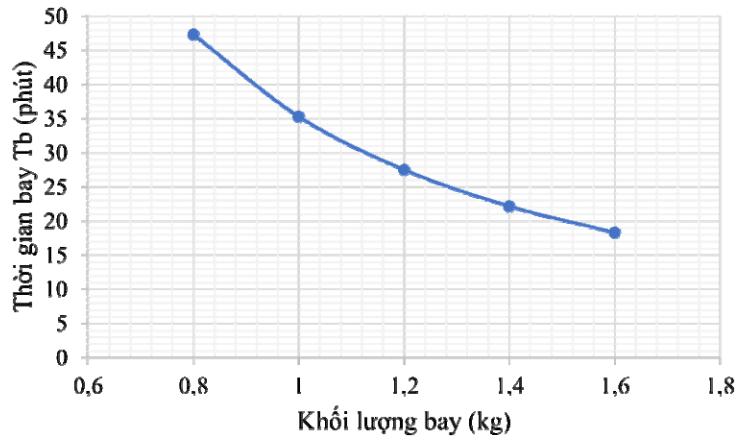
Hai yếu tố nhiệt độ môi trường và độ cao bay đều có ảnh hưởng đến thời gian bay của flycam, nhưng trong khoảng thay đổi thông thường như ở Việt Nam và trong độ cao bay phổ biến từ 30 m đến 400 m, ảnh hưởng này là không lớn. Thời gian bay vẫn giữ được độ ổn định tương đối, đảm bảo hiệu quả trong các ứng dụng dân dụng như giám sát nông nghiệp, khảo sát địa hình hay chụp ảnh trên cao. Tuy nhiên, nếu bay ở độ cao lớn hơn (ví dụ lên đến 6000 m như một số dòng flycam chuyên dụng), thời gian bay có thể giảm đáng kể do điều kiện không khí thay đổi mạnh.



Hình 1. Thời gian bay phụ thuộc vào độ cao và nhiệt độ môi trường

Hình 2 minh họa mối quan hệ giữa khối lượng bay và thời gian bay của flycam. Trên biểu đồ, trục hoành thể hiện khối lượng bay (tính bằng kg), bao gồm toàn bộ trọng lượng của thiết bị bay, pin và các thiết bị gắn kèm như camera, cảm biến, v.v. Trục tung biểu diễn thời gian bay (phút). Từ đồ thị, có thể thấy rằng khi khối lượng bay tăng từ khoảng 0,75 kg đến 1,6 kg, thời gian bay giảm một cách rõ rệt. Đường cong biểu diễn xu hướng giảm không tuyến tính: chỉ cần tăng một lượng nhỏ về khối lượng, thời gian bay có thể bị rút ngắn đáng kể. Ví dụ, nếu tăng từ 0,75 kg lên khoảng 1,2 kg, thời gian bay giảm từ gần 48 phút xuống còn khoảng 33 phút – tức mất hơn 30% thời lượng chỉ với chưa đến 0,5 kg tải thêm. Điều này phản ánh rằng khối lượng bay là một trong những yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất đến hiệu suất bay của flycam. Khi tải trọng tăng, động cơ phải sinh công lớn hơn để duy trì lực nâng, làm tiêu tốn nhiều năng lượng hơn, từ đó rút ngắn thời gian hoạt động.

Vì vậy, nếu mục tiêu là tối ưu thời gian bay, một trong những giải pháp hiệu quả nhất là giảm thiểu tối đa khối lượng bay, bao gồm cả việc sử dụng pin nhẹ hơn, thiết bị gắn kèm tối giản và lựa chọn vật liệu nhẹ cho cấu trúc flycam. Tuy nhiên, cần cân đối giữa việc giảm trọng lượng và duy trì chức năng bay cần thiết để đảm bảo nhiệm vụ thực địa vẫn được thực hiện hiệu quả.



Hình 2. Thời gian bay phụ thuộc vào khối lượng bay

3.2. Thời gian bay phụ thuộc vào loại pin

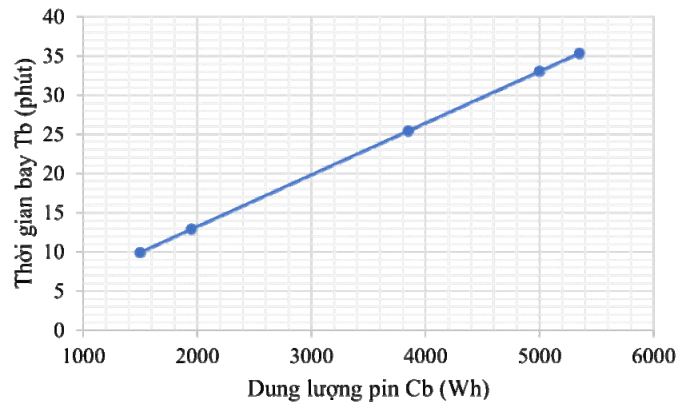
Thời gian bay của flycam phụ thuộc chặt chẽ vào loại pin được sử dụng, đặc biệt là dung lượng của pin (tính bằng mAh hoặc Wh). Pin có dung lượng càng lớn thì khả năng cung cấp năng lượng cho động cơ càng lâu, giúp flycam bay được lâu hơn. Tuy nhiên, dung lượng tăng cũng đồng nghĩa với trọng lượng pin tăng, làm ảnh hưởng đến tải trọng và hiệu suất bay. Do đó, việc lựa chọn pin cần cân nhắc giữa dung lượng, trọng lượng và yêu cầu nhiệm vụ để tối ưu hóa thời gian bay của flycam. Nghiên cứu này ví dụ một số loại pin có dung lượng khác nhau có thể lắp cho flycam (xem Bảng 2).

Bảng 2. Thông số kỹ thuật một số loại pin sử dụng cho flycam

Flycam	Dung lượng	Chủng loại	Năng lượng	Khối lượng pin (kg)
DJI Mavic 2	3 850 mAh	Lipo 4S	59 Wh	0,297
DJI Mavic 3/3E/3T	5 000 mAh	Lipo 4S	77 Wh	0,335
DJI Phantom 4/Pro/Advanced	5350 mAh	Lipo 4S	89,2 Wh	0,462
DJI BG30	1950 mAh	Lipo 4S	30 Wh	0,265
CNHL Black Series 4S 1500mAh	1500 mAh	Lipo 4S	23,1 Wh	0,175

Hình 3 trình bày mối quan hệ giữa dung lượng pin (tính bằng Wh) và thời gian bay (tính bằng phút) của flycam. Trục hoành thể hiện dung lượng pin từ khoảng 1500 Wh đến 5500 Wh, trong khi trục tung cho thấy thời gian bay tương ứng. Từ đồ thị, dễ dàng nhận thấy rằng khi dung lượng pin tăng, thời gian bay cũng tăng lên gần như tuyến tính. Cụ thể, với mỗi mức tăng đều đặn về dung lượng pin, thời gian bay cũng tăng theo một tỉ lệ gần như không đổi. Ví dụ, khi dung lượng pin tăng từ 1500 Wh lên 5000 Wh, thời gian bay tăng từ khoảng 12 phút lên đến gần 36 phút. Điều này cho thấy rằng năng lượng tích trữ trong pin là yếu tố then chốt quyết định hiệu suất và độ bền hoạt động của flycam trong mỗi lần cất cánh.

Tuy nhiên, một điểm quan trọng cần lưu ý là: dung lượng pin tăng thường kéo theo khối lượng pin tăng, điều này có thể ảnh hưởng tiêu cực đến thời gian bay nếu tổng tải trọng vượt mức tối ưu của flycam. Việc mang một viên pin quá nặng có thể làm tăng lực cản trọng lực, khiến động cơ phải hoạt động vất vả hơn, tiêu hao năng lượng nhanh hơn và từ đó làm giảm hiệu quả thực tế. Do đó, trong thiết kế và lựa chọn pin cho flycam, cần có sự cân đối hợp lý giữa dung lượng và khối lượng pin. Mục tiêu là chọn pin đủ lớn để tăng thời gian hoạt động, nhưng không vượt quá giới hạn tải trọng cho phép, nhằm duy trì hiệu quả bay tối ưu.



Hình 3. Thời gian bay phụ thuộc vào dung lượng pin

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày một phương pháp để ước tính thời gian bay của flycam dựa trên việc lựa chọn đồng bộ các thành phần gồm cánh quạt, động cơ điện, ESC và pin. Bằng cách sử dụng các công thức tính cho từng thành phần cùng với các tham số môi trường nhằm xác định thời gian bay trong các điều kiện vận hành cụ thể. Kết quả cho thấy thời gian bay treo bị ảnh hưởng đáng kể bởi các đặc tính khí động học của cánh quạt, hiệu suất và lực đẩy của động cơ, khả năng đáp ứng của ESC, cũng như dung lượng năng lượng của pin.

Thông qua các công thức tính toán, các nhà thiết kế có thể xác định nhiều cấu hình khác nhau nhằm đáp ứng các yêu cầu thiết kế như khối lượng cất cánh tối đa, thời gian bay tối thiểu cần thiết và khả năng mang tải. Kết quả nghiên cứu mang lại định hướng hữu ích cho việc lựa chọn hệ thống đẩy sao cho đạt được hiệu quả giữa năng lượng, trọng lượng và điều kiện bay.

LỜI CẢM ƠN

Xin trân trọng cảm ơn Chương trình Khoa học và Công nghệ trọng điểm cấp Nhà nước KC.07/21-30 đã xem xét, phê duyệt và cấp kinh phí để thực hiện đề tài “**Nghiên cứu ứng dụng công nghệ IoT, AI và UAV trong chăm sóc, kiểm soát sâu bệnh hại chính cho cây điều các tỉnh vùng Đông Nam Bộ**”. Sự hỗ trợ quý báu này là nguồn động lực quan trọng, tạo điều kiện để nghiên cứu triển khai các hoạt động khoa học – công nghệ, trong đó có việc công bố bài báo “**Nghiên cứu, tính toán thời gian bay cho flycam chụp ảnh dựa trên các thông số của hệ thống đẩy**”.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Faiyaz Ahmed, J. C. Mohanta, Anupam Keshari, Pankaj Singh Yadav, Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review, Arabian Journal for Science and Engineering (2022) 47:7963–7984.
- [2] Jung-Sup Um, Drones as Cyber-Physical Systems Concepts and Applications for the Fourth Industrial Revolution, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019.
- [3] Krishna K. R., Agricultural drones - A Peaceful Pursuit, 2018 by Apple Academic Press, Inc.
- [4] Quan Quan, Xunhua Dai, Shuai Wang, Multicopter Design and Control Practice, House of Electronics Industry, 2020.
- [5] Terry Kilby, Belinda Kilby. Make: Getting Started with Drones. 2016 Elevated Element, LLC.
- [6] DJI Mavic 3M, User_Manual_EN, internet: <https://dl.djicdn.com/downloads>.

ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG KÍCH THƯỚC MICRO TỚI ỨNG XỬ PHI TUYẾN CỦA DÀM XÓP

Đặng Ngọc Duyên^{1,2}

¹Trường Đại học Thủy lợi, email: duyen.dndp@tlu.edu.vn

²Học viện Khoa học và Công nghệ

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong thời gian gần đây, các kết cấu khung và dầm có kích thước micro đã được ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn, đặc biệt trong các hệ thống vi cơ điện tử (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS) [1]. Việc nghiên cứu và dự đoán các đặc tính cơ học của kết cấu micro nói chung, cũng như khung và dầm micro nói riêng, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần thiết kế và chế tạo tối ưu các thiết bị vi mô một cách chính xác và hiệu quả hơn.

Do có kích thước rất nhỏ và thường phải chịu các tải trọng cơ - điện phức tạp trong quá trình làm việc, các kết cấu micro này trong nhiều trường hợp có tỉ lệ độ võng so với kích thước hình học tương đối lớn. Do đó, yếu tố phi tuyến hình học là một thành phần quan trọng cần được xem xét trong quá trình phân tích cơ học của dầm và khung micro.

Ngoài ra, khác với các kết cấu ở cấp độ vĩ mô (macro), nhiều nghiên cứu mô phỏng gần đây đã chỉ ra rằng hiệu ứng kích thước micro có ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính cơ học của vật liệu và kết cấu vi mô.

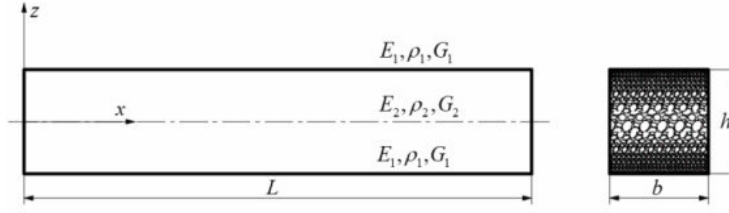
Đối với các dầm micro làm bằng vật liệu xốp - một dạng đặc biệt của vật liệu có cơ tính biến thiên (Functionally Graded Porous - FGP), cấu trúc vật liệu gồm các lỗ rỗng phân bố liên tục theo quy luật xác định nhằm điều chỉnh các tính chất cơ học của chúng. Nhờ đó, vật liệu xốp không chỉ kế thừa các ưu điểm của vật liệu có cơ tính biến thiên truyền thống mà còn sở hữu những đặc tính nổi bật như trọng lượng nhẹ, khả năng hấp thụ năng lượng cao, cách âm, cách nhiệt và thẩm thấu tốt [2].

Trong các nghiên cứu ban đầu về mất ổn định và ứng xử phi tuyến của dầm và khung micro [3], các lý thuyết dầm cổ điển đã được sử dụng. Tuy nhiên, các lý thuyết này không xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước micro, nên không phù hợp để mô hình hóa các kết cấu nhỏ. Để khắc phục hạn chế này, nhiều lý thuyết liên tục bậc cao đã được phát triển, điển hình như lý thuyết đàn hồi gradient biến dạng [4, 5] và lý thuyết ứng suất cặp sửa đổi [6], trong đó có xét đến tham số tỉ lệ chiều dài để phản ánh hiệu ứng kích thước. Sử dụng lý thuyết này, các tác giả đã nghiên cứu uốn phi tuyến phụ thuộc vào kích thước của dầm có kích thước micro một đầu ngàm [7], J. Jiang và L. Ke đã phân tích dao động tuyến tính và phi tuyến của dầm FGP có kích thước micro chịu ràng buộc đàn hồi phi tuyến với bề mặt gồ ghề [8].

Với cơ sở đó, bài báo này tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước micro tới ứng xử phi tuyến của dầm xốp bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Dựa trên lý thuyết dầm cổ điển Euler-Bernoulli, kết hợp với lý thuyết ứng suất cặp sửa đổi và phi tuyến hình học von Kármán, một công thức phần tử dầm phi tuyến được thiết lập để xây dựng phương trình cân bằng. Đáp ứng phi tuyến của dầm micro với các điều kiện biên khác nhau và tải trọng phân bố đều được tính toán bằng phương pháp lặp Newton-Raphson.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Xét một dầm giản đơn kích thước micro với chiều dài L , thiết diện ngang hình chữ nhật ($b \times h$), chịu tác động tải trọng cơ học. Dầm được giả định được làm từ vật liệu thép không gỉ (SUS304), với các lỗ rỗng phân bố đối xứng theo chiều dày của dầm, như được minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Dầm FGP với sự phân bố lỗ rỗng dọc theo chiều dày

Tính chất hiệu dụng của vật liệu, cụ thể là mô-đun đàn hồi và mô-đun trượt được xác định theo quy luật dưới đây [9]:

$$E(z) = E_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\pi \frac{z}{h}\right) \right], \quad G(z) = G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\pi \frac{z}{h}\right) \right] \quad (1)$$

trong đó e_0 biểu thị hệ số độ rỗng, E_1 là mô-đun đàn hồi, G_1 là mô-đun trượt của vật liệu (SUS304).

e_0 có thể thu được từ các giá trị trên: $e_0 = 1 - \frac{E_2}{E_1} = \frac{G_2}{G_1}$, $0 < e_0 < 1$.

Dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, chuyển vị dọc trục $u(x, z, t)$ và chuyển vị ngang $w(x, z, t)$ tại một điểm có tọa độ (x, z) bất kỳ trên dầm được xác định như sau [10]:

$$\begin{aligned} u(x, z, t) &= u_0(x, t) - z w_{0,x}(x, t) \\ w(x, z, t) &= w_0(x, t) \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó: $u_0(x, t)$ và $w_0(x, t)$ tương ứng là chuyển vị dọc trục và chuyển vị ngang của một điểm trên mặt giữa của dầm và có tọa độ x ; t là biến thời gian. Dấu phẩy chỉ số dưới trong công thức (2) cũng như các công thức khác để biểu thị đạo hàm riêng đối với biến theo sau, ví dụ: $w_{0,x} = \partial w_0 / \partial x$.

Dựa theo giả thiết phi tuyến von Kármán để mô tả các biến dạng lớn và chuyển vị lớn bao gồm cả ảnh hưởng của sự thay đổi hình dạng trong quá trình biến dạng của kết cấu, với lý thuyết dầm sử dụng ở đây, chỉ có biến dạng dọc trục được suy ra từ công thức (2) như sau:

$$\varepsilon_{xx} = u_{,x} + \frac{1}{2} w_{,x}^2 = u_{0,x} - z w_{0,xx} + \frac{1}{2} w_{0,x}^2 = \varepsilon_0 - z w_{0,xx} \quad (3)$$

trong đó, $\varepsilon_0 = u_{0,x} + \frac{1}{2} w_{0,x}^2$ là biến dạng màng.

Với giả thiết đàn hồi tuyến tính, trong đó ứng xử vật liệu tuân theo định luật Hooke, ứng suất pháp của dầm được cho bởi:

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} \quad (4)$$

Vì các lý thuyết cơ học cổ điển không có khả năng mô tả được các hiệu ứng kích thước, nên lý thuyết ứng suất cặp sửa đổi (Modified couple stress theory - MCST) dựa trên giả thiết ứng xử đàn hồi, được sử dụng kết hợp với lý thuyết dầm Euler-Bernoulli để tính năng lượng biến dạng đàn hồi của dầm như sau [6]:

$$U_B = U_M + U_S \quad (5)$$

$$U_M = \frac{1}{2} \int_V (\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}) dV, \quad U_S = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{m} : \boldsymbol{\chi}) dV \quad (6)$$

trong đó, U_M là năng lượng biến dạng đàn hồi của dầm macro, U_S là năng lượng biến dạng đàn hồi sinh ra do ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước, V là thể tích của dầm micro, $\boldsymbol{\sigma}$ là ten-xơ ứng suất, $\boldsymbol{\varepsilon}$ là ten-xơ biến dạng, $\mathbf{m}$ biểu thị các thành phần lệch của ten-xơ ứng suất cặp, $\boldsymbol{\chi}$ là ten-xơ độ cong đối xứng.

Năng lượng biến dạng của dầm micro trong công thức (5) có thể viết lại dưới dạng như sau:

$$U_B = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + 2m_{xy} \chi_{xy}) dA dx \quad (7)$$

ở đây: $A = b \times h$ là diện tích mặt cắt ngang của dầm.

$$\chi_{xy} = -\frac{1}{2}w_{0,xx}, \quad m_{xy} = 2G\ell\chi_{xy} \quad (8)$$

với ℓ là tham số tỉ lệ kích thước của vật liệu [6] về mặt vật lý nó chính là thước đo để đánh giá ảnh hưởng của cặp ứng suất, G là mô-đun trượt.

Công của lực ngoài tác dụng lên dầm micro được cho bởi:

$$W_{ex} = \int_0^L w(x)q(x)dx + \sum_{i=1}^{n_Q} Q_i(x_i)w(x_i) \quad (9)$$

trong đó: $q(x)$ là tải trọng phân bố dọc theo chiều dài của dầm micro, $Q_i(x_i)$ là tải trọng tập trung tại điểm có tọa độ x_i , n_Q là số tải trọng tập trung tác dụng lên dầm.

Hệ phương trình cân bằng phi tuyến cho dầm micro có thể thu được từ nguyên lý công ảo và được viết dưới dạng:

$$\delta U_B - \delta W_{ex} = 0 \quad (10)$$

Phương trình (10) là hệ phương trình cân bằng phi tuyến cho dầm micro, với hai ẩn số là u_0 và w_0 . Tuy nhiên, hệ phương trình này rất khó để giải bằng phương pháp giải tích. Do vậy, trong bài báo này sẽ sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, một công cụ hiệu quả để giải các bài toán phi tuyến.

Chia dầm thành NE phần tử, với mỗi phần tử dầm có hai nút. Véc-tơ chuyển vị nút ($\mathbf{d}$) cho phần tử có dạng:

$$\mathbf{d} = \{\mathbf{d}_u \quad \mathbf{d}_w\}^T \quad (11)$$

trong đó:

$$\mathbf{d}_u = \{u_{0_1} \quad u_{0_2}\}^T, \quad \mathbf{d}_w = \{w_{0_1} \quad w_{0,x_1} \quad w_{0_2} \quad w_{0,x_2}\}^T \quad (12)$$

tương ứng là véc-tơ chuyển vị nút của u_0 và w_0 .

Trong đó biểu thức (12), các thành phần u_{0_i} , w_{0_i} và w_{0,x_i} là các chuyển vị dọc trục, chuyển vị ngang và đạo hàm chuyển vị ngang theo x tại mặt cắt tại nút i của phần tử ($i = 1, 2$). Chỉ số trên 'T' được sử dụng để biểu thị chuyển vị của một véc-tơ hay một ma trận.

Sử dụng các hàm nội suy tuyến tính và các hàm nội suy Hermite để nội suy cho u_0 và w_0 theo các chuyển vị nút phần tử như trong [10]:

$$u_0 = \mathbf{N}\mathbf{d}_u; \quad w_0 = \mathbf{H}\mathbf{d}_w \quad (13)$$

ở đây $\mathbf{N}$ và $\mathbf{H}$ là các hàm dạng đa thức tuyến tính và bậc ba như trong [10].

Đạo hàm u_0 và w_0 trong công thức (13) thay vào công thức (10) ta thu được hệ phương trình cân bằng phi tuyến của phần tử. Lắp ghép từng phần tử vào các bậc tự do tổng thể ta thu được hệ phương trình cân bằng phi tuyến tổng thể:

$$\mathbf{R}(\mathbf{D}, \mathbf{F}_{ex}) = \mathbf{F}_{ex} - \mathbf{F}_{in}(\mathbf{D}) = 0 \quad (14)$$

trong đó $\mathbf{D}$, $\mathbf{F}_{ex}$, $\mathbf{F}_{in}$ và $\mathbf{R}$ lần lượt là véc-tơ tổng thể của các bậc tự do, ngoại lực, nội lực và véc-tơ lực dư.

Ma trận độ cứng tiếp tuyến tổng thể thu được bằng cách thay đổi gia số nội lực tổng thể:

$$\mathbf{K}_t(\mathbf{D}) = \frac{\partial \mathbf{F}_{in}(\mathbf{D})}{\partial \mathbf{D}} \quad (15)$$

và được sử dụng trong phương trình cân bằng phi tuyến như sau:

$$\mathbf{K}_t(\mathbf{D})\delta\mathbf{D} = \mathbf{R}(\mathbf{D}, \mathbf{F}_{ex}) = \mathbf{F}_{ex} - \mathbf{F}_{in}(\mathbf{D}) \quad (16)$$

Phương trình này được giải cho véc-tơ tổng thể $\mathbf{D}$ bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Chi tiết về phương pháp giải và cách triển khai phương pháp này được đưa ra trong [11, 12].

Một tiêu chuẩn hội tụ là cần thiết cho thuật toán lặp. Trong bài này, tiêu chuẩn dựa trên chuẩn Ô-clit được sử dụng cho quá trình lặp như sau:

$$\|\mathbf{R}\| \leq \varepsilon \|\mathbf{F}_{ex}\| \quad (17)$$

với ε là hệ số dung sai, có giá trị được chọn là 10^{-4} .

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kiểm nghiệm mô hình

Để kiểm nghiệm mô hình, ở đây xét trường hợp riêng khi $e_0 = 0$, dầm trở thành dầm thuần nhất. Dầm tựa bản lề hai đầu, với các tham số vật liệu và kích thước của dầm được lấy theo như các tài liệu tham khảo [12, 13]: $E = 1.44(\text{GPa})$, $\nu = 0.38$, $h = 5 \times 17.6(\mu\text{m})$, $b = 2h$, $L = 20h$. Tải trọng phân bố đều lên dầm với cường độ $q_0 = 1(\text{N/m})$. Bảng 1 cho thấy, kết quả giữa mô hình hiện tại với các tài liệu tham khảo rất sát nhau, đặc biệt với tài liệu tham khảo số [13], sự sai số này có thể được giải thích là do việc sử dụng các lý thuyết hoặc các phương pháp khác nhau. Do đó, có thể khẳng định sự tin cậy của mô hình phần tử đã thiết lập ở đây. Chú ý rằng, các sai số Δ_1 , Δ_2 và Δ_3 được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned}\Delta_1(\%) &= \frac{|\text{Ket qua bai bao nay} - [12]^a|}{[12]^a} \times 100\%, \\ \Delta_2(\%) &= \frac{|\text{Ket qua bai bao nay} - [12]^b|}{[12]^b} \times 100\%, \\ \Delta_3(\%) &= \frac{|\text{Ket qua bai bao nay} - [13]|}{[13]} \times 100\%\end{aligned}\quad (18)$$

Để tiện cho thảo luận, các tham số không thứ nguyên sau đây được sử dụng:

$$\ell^* = \frac{\ell}{h}, w^* = 100 \frac{EI}{q_0 L^4} w_0^{\max} \quad (19)$$

ở đây I là mô men quán tính của mặt cắt ngang của dầm, $I = bh^3/12$.

Bảng 1. So sánh w^* của dầm micro tựa bản lề hai đầu chịu lực phân bố với các công bố trước đó

Nguồn	$\ell^* = 0$	$\ell^* = 0.2$	$\ell^* = 0.4$	$\ell^* = 0.6$	$\ell^* = 0.8$	$\ell^* = 1.0$
Bài báo này	1.2667	1.0900	0.7633	0.5067	0.3440	0.2434
[12] ^a	1.3021	1.1092	0.7679	0.5076	0.3442	0.2435
[12] ^b	1.3103	1.1162	0.7731	0.5116	0.3475	0.2464
[13] ^a	1.2667	1.0900	0.7633	0.5067	0.3440	0.2434
$\Delta_1(\%)$	2.72	1.73	0.60	0.18	0.06	0.04
$\Delta_2(\%)$	3.33	2.35	1.27	0.96	1.01	1.22
$\Delta_3(\%)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

^a Lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, ^b Lý thuyết dầm Timoshenko

Chú ý rằng, với lưới chia 12 phần tử cho dầm tựa hai đầu và 16 phần tử cho dầm ngàm hai đầu, thì kết quả hội tụ. Do đó, với tất cả các tính toán dưới đây được tính với lưới chia 16 phần tử.

3.2. Kết quả số và thảo luận

Trong phần này khảo sát một dầm kích thước micro chịu tải trọng phân bố đều. Các tham số vật liệu cơ bản (thép không gỉ SUS304) và tham số hình học của dầm như sau: vật liệu $E_I = 201\text{GPa}$, $\nu = 0.32$, chiều dài dầm $L = 250\mu\text{m}$, chiều rộng dầm $b = 50\mu\text{m}$ và chiều dày dầm $h = 3\mu\text{m}$.

Các điều kiện biên khác nhau của dầm micro được xét ở đây bao gồm:

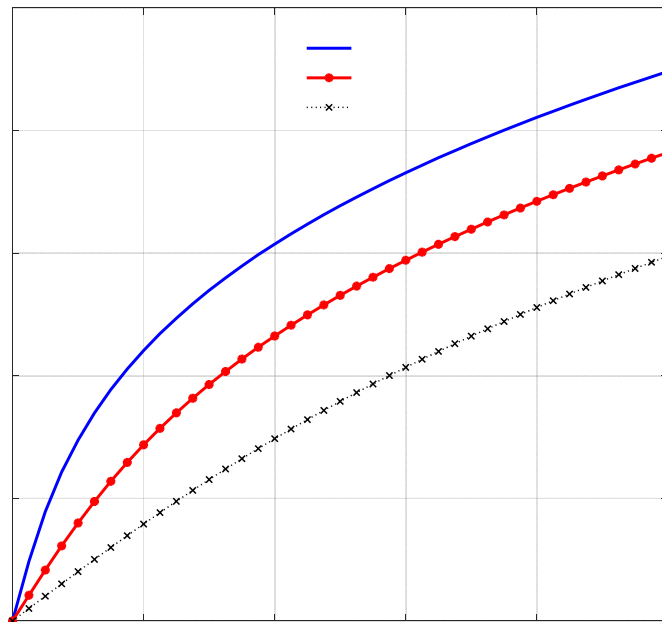
- Ngàm - Ngàm (CC): $u_0(0) = w_0(0) = w_{0,x}(0) = u_0(L) = w_0(L) = w_{0,x}(L)$
- Ngàm - Bản lề (CP): $u_0(0) = w_0(0) = w_{0,x}(0) = u_0(L) = w_0(L)$
- Bản lề - Bản lề (PP): $u_0(0) = w_0(0) = u_0(L) = w_0(L)$

Bảng 2 trình bày kết quả độ võng không thứ nguyên của dầm micro chịu tác dụng của tải phân bố đều, với các điều kiện biên khác nhau, các tham số tỉ lệ kích thước vật liệu và hệ số độ rỗng thay đổi. Kết quả cho thấy độ võng của dầm tăng theo hệ số độ rỗng và giảm theo tham số tỉ lệ kích thước. Nguyên nhân là do hệ số độ rỗng càng lớn thì độ cứng của dầm càng giảm, dẫn đến độ võng tăng lên. Đối với mọi điều kiện biên được xem xét, độ võng của dầm micro luôn thấp hơn khi tham số tỉ lệ kích thước của vật liệu lớn hơn, bất kể mức tải trọng. Điều này cho thấy rằng việc tăng tham số tỉ lệ kích thước của vật liệu giúp dầm micro trở nên cứng hơn. Nếu bỏ qua hiệu ứng kích thước nhỏ, độ võng có thể bị đánh giá quá cao.

Bảng 2. Kết quả độ võng ngang w^* của dầm micro chịu lực phân bố đều $q_0 = 10(N/m)$

ĐKB	ℓ^*	$e_0 = 0.1$	$e_0 = 0.2$	$e_0 = 0.3$	$e_0 = 0.4$	$e_0 = 0.5$	$e_0 = 0.6$	$e_0 = 0.7$	$e_0 = 0.8$
PP	0.2	0.2213	0.2268	0.2329	0.2397	0.2472	0.2557	0.2655	0.2767
	0.4	0.2145	0.2202	0.2265	0.2334	0.2412	0.2499	0.2599	0.2714
	0.6	0.2028	0.2088	0.2154	0.2226	0.2307	0.2398	0.2501	0.2621
	0.8	0.1864	0.1927	0.1997	0.2074	0.2159	0.2254	0.2363	0.2488
CP	0.2	0.1923	0.1976	0.2033	0.2097	0.2168	0.2247	0.2337	0.2441
	0.4	0.1765	0.1821	0.1882	0.1949	0.2024	0.2107	0.2202	0.2311
	0.6	0.1521	0.1580	0.1646	0.1717	0.1797	0.1886	0.1987	0.2103
	0.8	0.1233	0.1293	0.1359	0.1433	0.1515	0.1608	0.1713	0.1835
CC	0.2	0.1552	0.1601	0.1655	0.1714	0.1779	0.1851	0.1933	0.2026
	0.4	0.1289	0.1341	0.1398	0.1461	0.1531	0.1608	0.1696	0.1796
	0.6	0.0962	0.1012	0.1068	0.1130	0.1199	0.1277	0.1367	0.1471
	0.8	0.0686	0.0728	0.0774	0.0827	0.0888	0.0958	0.1040	0.1136

Trên hình 2, các đường cong thể hiện mối quan hệ lực - độ võng của dầm micro FGP với tham số tỉ lệ kích thước của vật liệu $\ell^* = 0.3$, hệ số độ rỗng $e_0 = 0.2$ với ba điều kiện biên. Hình 2 cũng thể hiện rõ mối quan hệ này là phi tuyến, đặc biệt rõ ràng hơn với trường hợp dầm hai đầu bản lề.



Hình 2. Đường cong lực - độ võng không thứ nguyên w^* của dầm micro với $\ell^* = 0.3$ và $e_0 = 0.2$

4. KẾT LUẬN

Ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước micro tới ứng xử phi tuyến của dầm xoắn được nghiên cứu bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Dựa trên giả thuyết phi tuyến hình học von Kármán, kết hợp với lý thuyết ứng suất cặp sửa đổi (MCST) công thức phần tử dầm hữu hạn phi tuyến đã được xây dựng bằng sử dụng lý thuyết dầm cổ điển Euler-Bernoulli. Sử dụng phần tử dầm đã xây dựng, phương trình cân bằng phi tuyến rời rạc đã được thiết lập và sau đó được giải bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Độ võng cực đại không thứ nguyên của dầm micro chịu tải trọng phân bố đều đã được tính toán cho các tham số tỉ lệ chiều dài vật liệu khác nhau. Ảnh hưởng của tham số kích thước micro và các điều kiện biên đối với ứng xử phi tuyến của dầm micro đã được nghiên cứu. Kết quả số cho thấy phần tử dầm được xây dựng ở đây có khả năng mô phỏng chính xác ứng xử phi tuyến của dầm micro với số ít phần tử. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tham số kích thước micro có vai trò quan trọng đối với ứng xử phi tuyến của dầm micro và độ võng được đánh giá cao khi bỏ qua hiệu ứng kích thước micro.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Thủy lợi trong đề tài mã số CS2025-01. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã tài trợ kinh phí thực hiện đề tài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. I. Younis. (2011). MEMS linear and nonlinear statics and dynamics, Vol. 20. Springer Science & Business Media.
- [2] Lefebvre, L.-P., Banhart, J., Dunand, D. (2008). Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials*, 10(9):775–787.
- [3] B. Choi and E. Lovell. (1997). Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 7, (1), pp. 1-24.
- [4] D. C. C. Lam, F. Yang, A. C. M. Chong, et al., (2003). Experiments and theory in strain gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51, (8), pp. 1477–1508.
- [5] M. H. Kahrobaian, M. Asghari, M. Rahaeifard, and M. T. Ahmadian. (2011). A nonlinear strain gradient beam formulation. *International Journal of Engineering Science*, 49, (11), pp. 1256–1267.
- [6] F. A. C. M. Yang, A. C. M. Chong, D. C. C. Lam, and P. Tong. (2002). Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 39, (10), pp. 2731–2743.
- [7] T. T. H. Bui, C. I. Le, D. K. Nguyen. (2024). Size-dependent nonlinear bending of tapered cantilever microbeam based on modified couple stress theory. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 62(6), pp. 1196-1209.
- [8] J. Jiang, L. Ke. (2024). Linear and nonlinear vibrations of nonlinearly elastically constrained functionally graded porous microbeams with rough surface. *Engineering Structures*. Vol. 312, 1 August 2024, 118223.
- [9] Chen D, Yang J, Kitipornchai S. Free and forced vibrations of shear deformable functionally graded porous beams. *Int J Mech Sci*, 2016; 108:14-22.
- [10] N. D. Dang, D. K. Nguyen, C.I. Le. (2024). Size-dependent nonlinear bending of microbeams based on a third-order shear deformation theory. *Vietnam Journal of Mechanics*, 46(2), pp. 119-137.
- [11] S. Krenk. (2009). Non-linear modeling and analysis of solids and structures. Cambridge University Press.
- [12] Reddy, J. (2011). Microstructure-dependent couple stress theories of functionally graded beams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11), pp. 2382-2399.
- [13] Y.-G. Wang, W.-H. Lin, and N. Liu. (2015). Nonlinear bending and post-buckling of extensible microscale beams based on modified couple stress theory. *Applied Mathematical Modelling*, 39, (1), pp. 117–127.

MÔ HÌNH HÓA VÀ ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHO QUAV SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BẬC PHÂN SỐ

Nguyễn Huy Thế, Nguyễn Văn Ninh

Trường Đại học Thủy lợi, email: nguyenhuythe@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong những năm gần đây, máy bay không người lái dạng bốn cánh quạt (Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles – QUAV) đã thu hút được sự quan tâm rộng rãi từ cộng đồng nghiên cứu và công nghiệp nhờ vào khả năng bay linh hoạt, cấu trúc cơ khí đơn giản và chi phí triển khai tương đối thấp. Dựa vào khả năng cất cánh và hạ cánh thẳng đứng cũng như điều khiển chính xác trong không gian hẹp, các hệ thống QUAV ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như nông nghiệp thông minh, giám sát an ninh, khảo sát địa hình, cứu hộ cứu nạn và các nhiệm vụ quân sự. [1-3]. Tuy nhiên, để đáp ứng được yêu cầu điều khiển chính xác trong các môi trường làm việc phức tạp và có nhiều yếu tố bất định, cần phải xây dựng các chiến lược điều khiển tiên tiến nhằm đảm bảo tính ổn định và hiệu suất cao cho hệ thống. Bản chất của QUAV là một hệ cơ điện tử có tính phi tuyến mạnh, đa biến, thiếu cơ cấu chấp hành và dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu từ môi trường và sự thay đổi mô hình. Với sáu bậc tự do nhưng chỉ có bốn cơ cấu chấp hành (bốn cánh quạt), việc điều khiển QUAV trở thành một bài toán khó và nhiều thách thức. Trước thực tế này, nhiều phương pháp điều khiển đã được đề xuất, trong đó điều khiển trượt (Sliding Mode Control – SMC) được đánh giá cao nhờ tính bền vững, khả năng chống nhiễu tốt và độ ổn định cao ngay cả khi hệ thống tồn tại bất định mô hình hoặc chịu tác động của nhiễu ngoài. Tuy nhiên, một trong những hạn chế lớn nhất của điều khiển trượt truyền thống là hiện tượng xuất hiện dao động tần số cao quanh bề mặt trượt (chattering), làm giảm tuổi thọ cơ cấu chấp hành và gây nhiễu trong điều khiển chính xác.

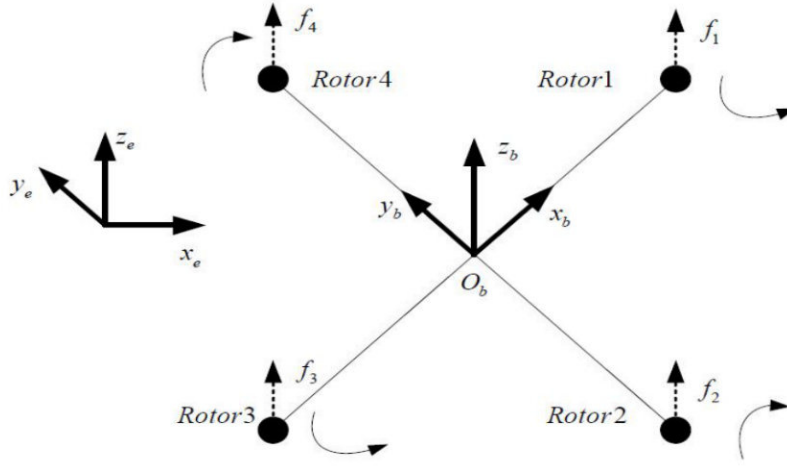
Để khắc phục nhược điểm này, nhiều biến thể của SMC đã được phát triển, tiêu biểu như Nonsingular Terminal SMC giúp rút ngắn thời gian hội tụ nhưng dễ nhạy cảm với nhiễu mô hình, hay Adaptive SMC giúp cải thiện khả năng thích nghi trước bất định tham số nhưng thường phức tạp trong thiết kế và đòi hỏi nhiều thông tin trạng thái. Trong bối cảnh đó, điều khiển trượt bậc phân số (Fractional-Order Sliding Mode Control - FOSMC) được xem là một hướng tiếp cận triển vọng. Khác với các biến thể nói trên, FOSMC tích hợp toán tử đạo hàm bậc phân số vào cấu trúc điều khiển giúp hệ thống đạt được tốc độ hội tụ linh hoạt hơn, khả năng bám quỹ đạo mượt mà hơn, mà còn làm giảm đáng kể hiện tượng chattering và khả năng lọc động học của đạo hàm phân số. Nói cách khác, FOSMC có thể kết hợp ưu điểm của SMC truyền thống về tính bền vững với khả năng cải thiện chất lượng điều khiển, vốn còn hạn chế ở nhiều biến thể khác.

Trong bài báo này, một bộ điều khiển FOSMC được đề xuất cho hệ thống QUAV, nhằm nâng cao hiệu suất bám quỹ đạo và kiểm soát các góc quay. Mô hình động học và động lực học của QUAV được xây dựng đầy đủ trong không gian ba chiều, kết hợp hệ tọa độ gắn với thân máy và hệ tọa độ quán tính. Trên cơ sở đó, hai vòng điều khiển được thiết kế: vòng ngoài đảm nhiệm điều khiển vị trí, vòng trong đảm nhiệm điều khiển các góc quay (các góc Euler), cả hai đều áp dụng cấu trúc điều khiển trượt bậc phân số nhằm tối ưu hóa chất lượng phản hồi.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình hóa

Hệ thống QUAV được mô hình hóa là một vật rắn đối xứng với bốn động cơ gắn cố định trên khung chữ X, có khả năng tạo ra lực nâng và mômen quay, như biểu diễn trong Hình 1. Các động cơ có tốc độ quay tương ứng là $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ sinh ra các lực nâng f_1, f_2, f_3, f_4 theo phương thẳng đứng hướng lên.



Hình 1. Mô hình đối tượng QUAV [4]

Cấu hình đối xứng này cho phép QUAV kiểm soát ba chuyển động quay: ϕ - góc quay quanh trục dọc thân (góc roll), θ - góc quay quanh trục ngang thân (góc pitch), và ψ - góc quay quanh trục thẳng đứng (góc yaw), tương ứng với các mômen sinh ra từ sự chênh lệch lực giữa các cặp động cơ đối diện hoặc chéo. Hệ trục tọa độ cố định $E(O_e, e_x, e_y, e_z)$ là hệ quy chiếu toàn cục với các trục e_x, e_y, e_z và hệ trục tọa độ động gắn với thân $B(O_b, b_x, b_y, b_z)$ bao gồm các trục b_x, b_y, b_z . Mối liên hệ giữa hai hệ tọa độ này được dùng để mô tả sự chuyển động của hệ thống trong không gian 3 chiều, thể hiện thông qua ma trận chuyển đổi:

$$\mathbf{R}_B^E = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\theta + c\phi s\theta s\psi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó $c\alpha = \cos(\alpha)$; $s\alpha = \sin(\alpha)$.

Dựa trên các định nghĩa hình học và động học đã trình bày, vận tốc quay của QUAV trong hệ tọa độ thân $B(O_b, b_x, b_y, b_z)$, ký hiệu là $\mathbf{W}_B = [p \quad q \quad r]^T$, có thể được liên hệ với vận tốc góc Euler thông qua ma trận chuyển đổi như sau:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\theta & s\phi c\theta \\ 0 & -s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Theo định luật Newton II, tổng các lực tác dụng lên hệ được thể hiện như sau:

$$\mathbf{F} - \mathbf{F}_g - \mathbf{F}_c = m\ddot{\mathbf{P}} \quad (3)$$

Trong đó: $\mathbf{F}_g = [0 \quad 0 \quad mg]^T$: lực trọng trường,

$\mathbf{F}_c = [k_{cx}\dot{x} \quad k_{cy}\dot{y} \quad k_{cz}\dot{z}]^T$: lực cản với k_{cx}, k_{cy}, k_{cz} là hệ số cản theo phương x, y .

$\mathbf{P} = [x \quad y \quad z]^T$: vị trí của QUAV trong hệ tọa độ.

Tổng lực nâng U_1 sinh ra bởi bốn rotor có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$U_1 = k_t (w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2) \quad (4)$$

Với k_t là hệ số tác động lên rotor, w_i là tốc độ của mỗi động cơ.

Ngoài ra, tác động lực nâng của các cánh quạt lên QUAV được phân tích như sau:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_B^E \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi \\ -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi \\ c\phi c\theta \end{bmatrix} U_1 \quad (5)$$

Đặt $\mathbf{F}_1(\dot{\mathbf{P}}, \mathbf{Q}) = \frac{1}{m}(-\mathbf{F}_g - \mathbf{F}_c)$, với $\mathbf{P} = [x \ y \ z]^T$, $\mathbf{Q} = [\phi, \theta, \psi]^T$ phương trình (3) được viết gọn lại:

$$\ddot{\mathbf{P}} = \frac{\mathbf{F}}{m} + \mathbf{F}_1 \quad (6)$$

Chuyển động quay của hệ thống QUAV được mô tả bằng phương trình:

$$\mathbf{M} + \mathbf{M}_{\text{gry}} - \mathbf{M}_c = \mathbf{I}(\dot{\mathbf{W}}_B + \mathbf{W}_B \times \mathbf{W}_B) \quad (7)$$

Trong đó:

$\mathbf{M}_{\text{gry}} = J[p\Omega \ -q\Omega \ 0]^T$: Momen con quay hồi chuyển, với $\Omega = w_1 - w_2 + w_3 - w_4$, J là momen quán tính của rotor cánh quạt.

$\mathbf{M}_c = [k_{c\phi}\dot{\phi}^2 \ k_{c\theta}\dot{\theta}^2 \ k_{c\psi}\dot{\psi}^2]^T$: Momen cản, với $k_{c\phi}, k_{c\theta}, k_{c\psi}$ là hệ số cản theo các góc Roll, Pitch, Yaw.

$\mathbf{I} = \text{diag}(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})$: momen quán tính

Momen tác động lên QUAV được thể hiện theo phương trình dưới đây:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lk_t(w_2^2 - w_4^2) \\ lk_t(w_3^2 - w_1^2) \\ k_d(w_1^2 - w_2^2 + w_3^2 - w_4^2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Với k_d là hệ số tác động lên rotor, l là chiều dài cánh tay QUAV.

$$\text{Đặt } \mathbf{F}_2(\dot{\mathbf{Q}}) = \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}\dot{\phi}\dot{\theta} - \frac{J}{I_{xx}}\dot{\theta}\dot{\Omega} - \frac{k_{c\phi}\dot{\phi}^2}{I_{xx}} \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\dot{\psi}\dot{\phi} + \frac{J}{I_{yy}}\dot{\phi}\dot{\Omega} - \frac{k_{c\theta}\dot{\theta}^2}{I_{yy}} \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\dot{\phi}\dot{\theta} - \frac{k_{c\psi}\dot{\psi}^2}{I_{zz}} \end{bmatrix} \text{ với } \mathbf{Q} = [\phi, \theta, \psi]^T, \text{ phương trình (7) được viết lại:}$$

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \mathbf{I}^{-1}\mathbf{M} + \mathbf{F}_2 \quad (9)$$

2.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt bậc phân số

2.2.1. Thiết kế bộ điều khiển vị trí

Thuật toán điều khiển trượt được chia làm hai giai đoạn. Đầu tiên, bề mặt trượt được chọn để thu được các biến trạng thái của quỹ đạo. Thứ hai, bộ điều khiển được thiết kế để thúc đẩy tất cả trạng thái của hệ thống hội tụ về các điểm trên mặt trượt. Nói cách khác, dưới tác động của bộ điều khiển, trạng thái kích hoạt $\mathbf{P} = [x \ y \ z]$, ψ đạt quỹ đạo như mong muốn $\mathbf{P}_d = [x \ y \ z]$, ψ_d .

Các vectơ sai lệch bám quỹ đạo được định nghĩa:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= \mathbf{P}_d - \mathbf{P}; \\ \dot{\mathbf{e}}_1 &= \dot{\mathbf{P}}_d - \dot{\mathbf{P}} \end{aligned} \quad (10)$$

Phép tính phân số được tổng quát hóa từ phép tính số nguyên truyền thống cho đến các bậc không nguyên. Phép đạo hàm cấp phân số cấp α của hàm $f(x)$ dưới đây được định nghĩa bởi Riemann–Liouville [5] là:

$${}_{t_0}D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt} \right)^n \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-(n-\alpha)}} d(\tau) \quad (11)$$

với $\Gamma(x)$ là hàm gamma của Euler, n là số thực thỏa mãn $n-1 < \alpha < n$.

Với điều kiện ban đầu bằng 0, phép biến đổi Laplace của phép tính phân số dựa trên định nghĩa của Riemann–Liouville [5] là

$$L\{ {}_{t_0}D_t^\alpha f(t) \} = s^\alpha F(s) \quad (12)$$

Xét mặt trượt:

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{e}}_1 + \lambda_1 D^{-\mu} \mathbf{e}_1 \quad (13)$$

với $\mathbf{c}_1 = \text{diag}(c_x, c_y, c_z)$, $\lambda_1 = \text{diag}(\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13})$ là tham số bộ điều khiển, μ là bậc phân số của phép đạo hàm.

Lấy đạo hàm theo thời gian của bề mặt trượt được định nghĩa trong phương trình (13), ta thu được biểu thức động học

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}_1 &= \mathbf{c}_1 \dot{\mathbf{e}}_1 + \ddot{\mathbf{e}}_1 + \lambda_1 D^{1-\mu} \mathbf{e}_1 \\ &= \mathbf{c}_1 \dot{\mathbf{e}}_1 + \ddot{\mathbf{P}}_d - \frac{1}{m} (\mathbf{F} + m\mathbf{F}_1) + \lambda_1 D^{1-\mu} \mathbf{e}_1 \end{aligned} \quad (14)$$

Áp dụng bộ điều khiển trượt theo luật cấp số nhân:

$$\dot{\mathbf{s}}_1 = -\mathbf{n}_1 \cdot \text{sat}(\mathbf{s}_1) - \mathbf{k}_1 \mathbf{s}_1 \quad (15)$$

Với $\mathbf{n}_1 = \text{diag}(n_x, n_y, n_z)$, $\mathbf{k}_1 = \text{diag}(k_x, k_y, k_z)$ là các tham số điều khiển dương. Sau một vài phép biến đổi toán học thu được tín hiệu điều khiển:

$$\mathbf{F} = m(-\ddot{\mathbf{P}}_d + \mathbf{c}_1 \dot{\mathbf{e}}_1 + \mathbf{n}_1 \cdot \text{sat}(\mathbf{s}_1) + \mathbf{k}_1 \mathbf{s}_1) \quad (16)$$

Kết hợp phương trình (16) và (5) thu được:

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \\ \theta_d &= \arctan \left(\frac{F_x \cos \psi + F_y \sin \psi}{F_z} \right) \\ \phi_d &= \arctan \left(\frac{F_x \sin \psi - F_y \cos \psi}{F_z} \cos \theta_d \right) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

2.2.2. Thiết kế bộ điều khiển góc quay

Để điều khiển các góc Euler của QUAV, một vòng điều khiển bên trong được thiết kế dựa trên điều khiển trượt bậc phân số, tương tự với cấu trúc vòng điều khiển vị trí đã đề xuất. Cụ thể, các bề mặt trượt được xây dựng từ sai lệch giữa góc Euler mong muốn và góc thực tế, kết hợp với đạo hàm bậc phân số của sai số nhằm cải thiện tốc độ hội tụ và tính bền vững. Bộ điều khiển được thiết kế đảm bảo tiêu chí ổn định theo Lyapunov:

$$\mathbf{M} = \mathbf{I}(-\ddot{\mathbf{F}}_2 + \ddot{\mathbf{Q}}_d + \mathbf{c}_2 \dot{\mathbf{e}}_2 + \mathbf{n}_2 \cdot \text{sat}(\mathbf{s}_2) + \mathbf{k}_2 \mathbf{s}_2) \quad (18)$$

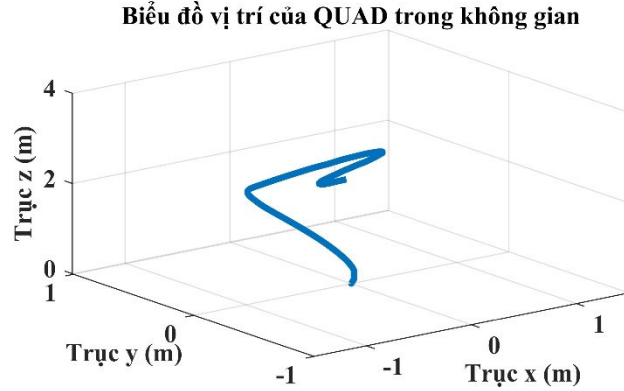
với $\mathbf{c}_2 = \text{diag}(c_\phi, c_\theta, c_\psi)$, $\mathbf{n}_2 = \text{diag}(n_\phi, n_\theta, n_\psi)$, $\mathbf{k}_2 = \text{diag}(k_\phi, k_\theta, k_\psi)$ là các tham số bộ điều khiển.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG SỐ

Xét đối tượng QUAV với các tham số mô hình được trình bày trong Bảng 1, chuyển động theo quỹ đạo tham chiếu cho trước được xác định bởi các phương trình:

$$x = \sin(0.1t), y = \sin(0.05t + \pi/2), z = 0.05x + 1$$

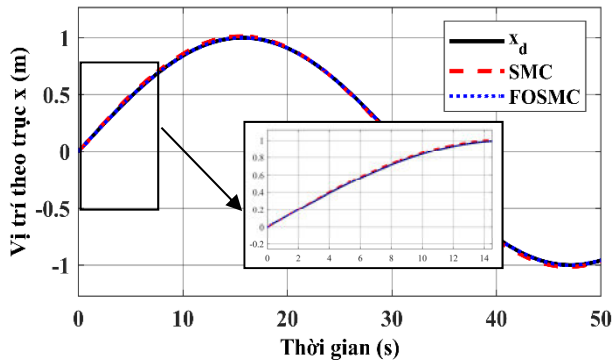
Quỹ đạo tham chiếu của QUAV được biểu diễn trong Hình 2.



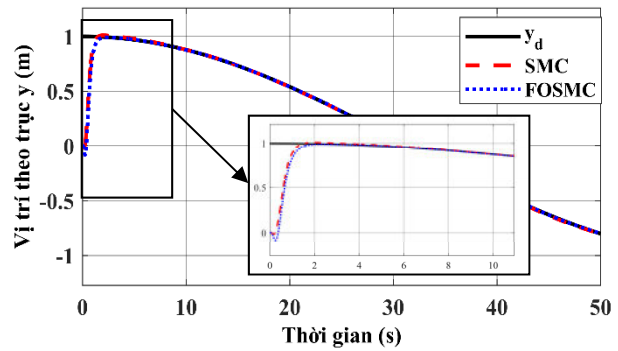
Hình 2. Quỹ đạo tham chiếu của QUAV

Bảng 1. Bảng thông số mô hình đối tượng

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
m	2,2 kg	J	$6,8 \times 10^{-6} \text{ (kg.m}^2\text{)}$
g	$9,81 \text{ m/s}^2$	$k_{c\phi}$	$6,8 \times 10^{-6} \text{ (N.m.s}^2\text{)}$
I_{xx}	$2,1 \times 10^{-2} \text{ (kg.m}^2\text{)}$	$k_{c\theta}$	$6,8 \times 10^{-6} \text{ (N.m.s}^2\text{)}$
I_{yy}	$1,9 \times 10^{-2} \text{ (kg.m}^2\text{)}$	$k_{c\psi}$	$6,8 \times 10^{-6} \text{ (N.m.s}^2\text{)}$
I_{zz}	$1,7 \times 10^{-2} \text{ (kg.m}^2\text{)}$	k_t	$4,5 \times 10^{-6} \text{ (N.s}^2\text{)}$

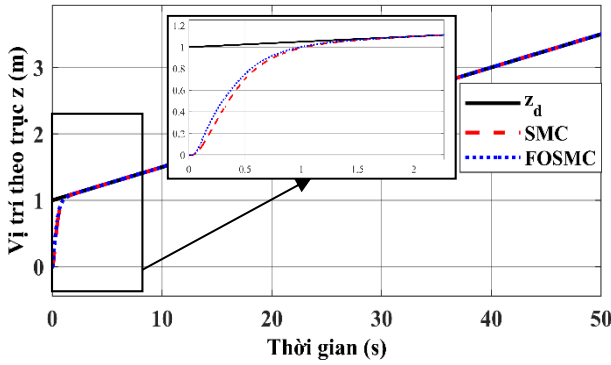


Hình 2. Vị trí của QUAV theo trục x

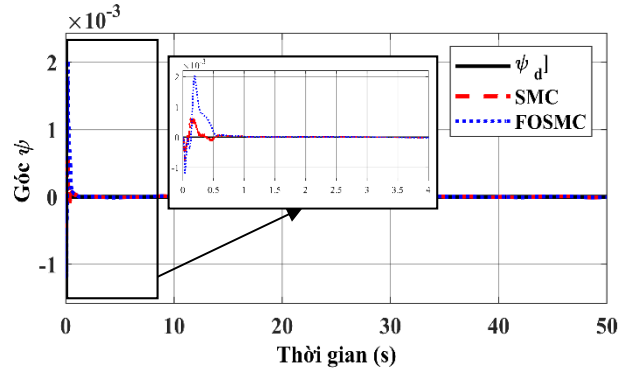


Hình 3. Vị trí của QUAV theo trục y

Kết quả đáp ứng của mô hình QUAV khi áp dụng bộ điều khiển trượt bậc phân số được thể hiện trong các Hình 2 - 5, so sánh với tín hiệu tham chiếu và bộ điều khiển trượt thông thường. Hình 2 biểu diễn vị trí của QUAV theo phương x, cả hai bộ điều khiển SMC và FOSMC đều bám quỹ đạo rất sát với tín hiệu tham chiếu, nhưng FOSMC có đáp ứng tốt có thời gian xác lập ngắn hơn (5s) so với SMC(7s), độ quá điều chỉnh (FOSMC – 5,5% so với 1,2%). Đối với vị trí của QUAV theo phương y trong Hình 3, trong khoảng 3s đầu tiên, FOSMC có tốc độ thay đổi vị trí nhanh hơn, nhưng vẫn giữ được độ bám tốt mà không gây độ quá điều chỉnh lớn (0,9%). Sau đó, cả hai bộ điều khiển đều ổn định và QUAV bám theo quỹ đạo tham chiếu.



Hình 4. Vị trí của QUAV theo trục z



Hình 5. Góc quay Yaw của QUAV

Hình 4 cho thấy FOSMC đáp ứng nhanh hơn SMC 5% trước khi 2 bộ điều khiển đưa đáp ứng đến vị trí đặt. Đối với góc quay của QUAV thể hiện trong Hình 5, ban đầu hệ thống dao động tương đối mạnh, tuy nhiên, FOSMC có dao động nhỏ hơn ở trạng thái xác lập, quỹ đạo mượt hơn so với SMC.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển trượt bậc phân số (FOSMC) cho hệ thống QUAV phi tuyến mạnh, với mô hình động học và động lực học đầy đủ trong không gian ba chiều. Kết quả mô phỏng Matlab/Simulink cho thấy FOSMC đạt độ chính xác bám quỹ đạo cao, tốc độ hội tụ nhanh và giảm chattering so với SMC truyền thống. Tuy nhiên, nghiên cứu mới dừng ở mô phỏng lý tưởng, chưa xét đến nhiễu gió, sai số cảm biến và trễ truyền động. Hướng nghiên cứu tiếp theo là thử nghiệm trên phần cứng hoặc đồng mô phỏng với môi trường thực tế (ROS, Gazebo) để nâng cao tính ứng dụng.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] X. Chen, Z. Li, Y. Yang, L. Qi, and R. Ke, “High-Resolution Vehicle Trajectory Extraction and Denoising from Aerial Videos,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 5, pp. 3190–3202, 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.3003782.
- [2] L. Xing and B. W. Johnson, “Reliability Theory and Practice for Unmanned Aerial Vehicles,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 4, pp. 3548–3566, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3218491.
- [3] H. Liu, Y. P. Tsang, C. K. M. Lee, and C. H. Wu, “UAV Trajectory Planning via Viewpoint Resampling for Autonomous Remote Inspection of Industrial Facilities,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 20, no. 5, pp. 7492–7501, 2024, doi: 10.1109/TII.2024.3361019.
- [4] F. Chen, R. Jiang, K. Zhang, B. Jiang, and G. Tao, “Robust Backstepping Sliding-Mode Control and Observer-Based Fault Estimation for a Quadrotor UAV,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 5044–5056, 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2552151.
- [5] D. Tavares, R. Almeida, and D. F. M. Torres, “Caputo derivatives of fractional variable order: Numerical approximations,” *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 35, pp. 69–87, 2016, doi: 10.1016/j.cnsns.2015.10.027.

DAO ĐỘNG TỰ DO CỦA DẦM FGM CÓ TÍNH CHẤT PHỤ THUỘC VÀO NHIỆT ĐỘ VỚI VỊ TRÍ CHÍNH XÁC CỦA TRỤC TRUNG HOÀ

Nguyễn Ngọc Huyền¹, Nguyễn Tiến Khiêm²

¹Trường Đại học Thủy lợi, email: nnhuyen@tlu.edu.vn

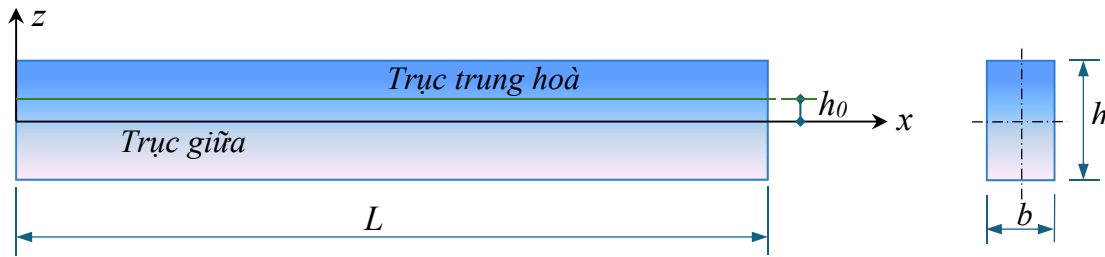
²Trường Đại học Công nghệ TP.HCM

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Vật liệu FGM (Functionally Graded Material) thường được làm từ gốm và kim loại trong hỗn hợp phân bố liên tục, nhằm mục đích đồng thời cung cấp khả năng chịu nhiệt và chịu tải cho các kết cấu như tàu vũ trụ, máy bay, nhà máy điện hạt nhân, v.v. Thực tế, các kết cấu làm bằng vật liệu FGM được thiết kế không chỉ để chịu tải cơ học mà còn để chịu tải nhiệt, do đó, ứng xử của các kết cấu FGM phụ thuộc vào nhiệt độ dưới tải nhiệt cần được nghiên cứu kỹ lưỡng. Các nghiên cứu về động lực học của dầm FGM, một lớp quan trọng của các kết cấu FGM đã được quan tâm nghiên cứu, tuy nhiên trong các nghiên cứu này thường sử dụng giả thiết vị trí trục trung hoà trùng với trục giữa của dầm. Do đặc điểm của vật liệu FGM, vị trí chính xác của trục trung hoà trong dầm FGM chịu tải nhiệt thay đổi theo chiều dày của dầm và ảnh hưởng của nó đến dao động của dầm FGM phụ thuộc vào nhiệt độ vẫn chưa được công bố nhiều. Trong nghiên cứu này, bài toán dao động tự do được xây dựng cho dầm FGM Timoshenko phụ thuộc nhiệt độ có kể đến vị trí chính xác của trục trung hoà. Sự thay đổi và ảnh hưởng của vị trí trục trung hoà và phân bố nhiệt độ lên tần số cơ bản của dầm FGM Timoshenko được chỉ ra chi tiết trong nghiên cứu này.

2. DAO ĐỘNG TỰ DO CỦA DẦM FGM

2.1. Mô hình dầm FGM có tính chất phụ thuộc nhiệt độ



Hình 1. Mô hình dầm FGM

Xét một dầm làm bằng vật liệu FGM có chiều dài L , diện tích mặt cắt ngang $A = b \times h$, như trong hình 1, với các đặc trưng vật liệu thay đổi theo chiều dày theo quy luật lũy thừa

$$P(z, T) = P_b(T) + [P_t(T) - P_b(T)](z/h + 1/2)^p, \quad -h/2 \leq z \leq h/2, \quad (1)$$

trong đó P biểu thị cho E , G và ρ , lần lượt là mô đun đàn hồi, mô đun trượt và mật độ khối và chỉ số t và b ký hiệu giá trị của các đặc trưng vật liệu này ở mặt trên (top) và mặt đáy (bottom); z là tọa độ tính từ mặt giữa ở độ cao $h/2$ kể từ đáy dầm, p là chỉ số phân bố thể tích; T là trường nhiệt độ [2]. Sự phụ thuộc của các đặc trưng của vật liệu được xác định bởi [2]

$$P(T) = P_0 \left[P_1 / T + 1 + P_2 T + P_3 T^2 + P_4 T^3 \right] \quad (2)$$

với các hằng số P_0, P_1, P_2, P_3 được xác định cụ thể theo các thành phần của vật liệu cấu tạo dầm (Bảng 1).

Bảng 1. Các hằng số vật liệu phụ thuộc vào nhiệt độ [2]

Vật liệu	Đặc trưng	P_0	P_{-1}	P_1	P_2	P_3
Si ₃ N ₄	E (Pa)	348.43e+9	0	-3.070e-4	2.160e-7	-8.946e-11
	ν	0.24	0	0	0	0
	α (K ⁻¹)	5.823e-6	0	9.095e-4	0	0
	ρ (kg/m ³)	2370	0	0	0	0
	k	9.19	0	0	0	0
SUS304	E (Pa)	2.01e+11	0	3.08e-4	-6.534e-7	0
	ν	0.3262	0	2.002e-4	3.797e-7	0
	α (K ⁻¹)	1.233e-5	0	8.086e-4	0	0
	ρ (kg/m ³)	8166	0	0	0	0
	k	12.04	0	0	0	0

Với những giả thiết biến dạng nhỏ, ta có trường chuyển vị được tính bằng

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - (z - h_0)\theta(x, t); w(x, z, t) = w_0(x, t), \quad (3)$$

trong đó $u_0(x, t)$, $w_0(x, t)$ là chuyển vị dọc trục và chuyển vị theo phương ngang của điểm nằm trên trục trung hoà; h_0 là khoảng cách từ trục trung hoà đến trục giữa theo phương trục z ; θ là góc xoay của tiết diện ngang. Do đó, mối liên hệ giữa trường chuyển vị và biến dạng

$$\varepsilon_x = \partial u_0 / \partial x - (z - h_0) \partial \theta / \partial x; \gamma_{xz} = \partial w_0 / \partial x - \theta \quad (4)$$

và

$$\sigma_x = E(z, T) \varepsilon_x; \tau_{xz} = \kappa G(z, T) \gamma_{xz}. \quad (5)$$

Ứng suất gây ra bởi nhiệt độ

$$\sigma_x^T = -E(z, T) \alpha(z, T) \Delta T(z), \quad (6)$$

trong đó $\alpha(z, T)$ là hệ số giãn nở nhiệt xác định theo biểu thức (1) và $\Delta T(z)$ là sự thay đổi của nhiệt độ theo chiều cao của dầm.

Sử dụng nguyên lý Hamilton, ta có thể thiết lập được phương trình chuyển động trong miền thời gian [3]

$$\begin{aligned} A_{11}u_{0,xx} - I_{11}u_{0,tt} - A_{12}\theta_{xx} + I_{22}\theta_{tt} &= 0; \\ A_{12}u_{0,xx} - I_{12}u_{0,tt} - A_{22}\theta_{xx} + I_{22}\theta_{tt} - A_{33}(w_{0,x} - \theta) &= 0; \\ (A_{33} - A_T)w_{0,xx} - I_{11}w_{0,tt} - A_{33}\theta_x &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Trong miền tần số, phương trình (7) có dạng

$$\begin{aligned} (A_{11}U_{xx} + \omega^2 I_{11}U) - (A_{12}\Theta_{xx} + \omega^2 I_{22}\Theta) &= 0; \\ (A_{12}U_{xx} + \omega^2 I_{12}U) - (A_{22}\Theta_{xx} + \omega^2 I_{22}\Theta) - A_{33}(W_x - \Theta) &= 0; \\ (A_{33} - A_T)W_{xx} + \omega^2 I_{11}W - A_{33}\Theta_x &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó

$$\{U(x, \omega), \Theta(x, \omega), W(x, \omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \{u_0(x, t), \theta(x, t), w_0(x, t)\} e^{-i\omega t} dt \quad (9)$$

phương trình (8) có thể viết dưới dạng ma trận

$$[\mathbf{A}]\{\mathbf{Z}_{xx}\} + [\mathbf{B}]\{\mathbf{Z}_x\} + [\mathbf{C}]\{\mathbf{Z}\} = \{\mathbf{0}\}, \quad (10)$$

trong đó

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} A_{11} & -A_{12} & 0 \\ A_{12} & -A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} - A_T \end{bmatrix}; [\mathbf{\Pi}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A_{33} \\ 0 & -A_{33} & 0 \end{bmatrix}; [\mathbf{\Gamma}] = \begin{bmatrix} \omega^2 I_{11} & -\omega^2 I_{12} & 0 \\ \omega^2 I_{12} & A_{33} - \omega^2 I_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 I_{11} \end{bmatrix};$$

$$\{\mathbf{Z}_{xx}\} = \{U_{xx}, \Theta_{xx}, W_{xx}\}^T; \{\mathbf{Z}_x\} = \{U_x, \Theta_x, W_x\}^T; \{\mathbf{Z}\} = \{U, \Theta, W\}^T.$$

2.2. Vị trí chính xác của trục trung hoà

Đối với dầm FGM, vị trí của trục trung hoà kể từ mặt giữa là h_0 được xác định từ điều kiện:

$$\int_{-h/2}^{h/2} E(z, T)[z - h_0] dz = 0 \quad (11)$$

Từ đó dẫn đến

$$h_0 = \int_{-h/2}^{h/2} E(z, T) z dz / \int_{-h/2}^{h/2} E(z, T) dz \quad (12)$$

Ta xác định được

$$h_0 = h \sum_{m=0}^3 \frac{(m+1)(m+2)(m+p)\bar{E}_m^t - p(2-m^2-mp)\bar{E}_m^b}{2(m+1)(m+2)(m+p+1)(m+p+2)} / \sum_{m=0}^3 \frac{(m+1)\bar{E}_m^t + p\bar{E}_m^b}{(m+1)(m+1+p)}. \quad (13)$$

2.3. Dao động tự do của dầm FGM

Nghiệm của phương trình (10) được xác định có dạng $\{\mathbf{Z}_0(x)\} = \{U_0, \Theta_0, W_0\}^T e^{\lambda x}$ dẫn đến phương trình đặc trưng

$$\det[\mathbf{A}\lambda^2 + \mathbf{\Pi}\lambda + \mathbf{\Gamma}] = a\lambda^6 + b\lambda^4 + c\lambda^2 + d = 0, \quad (14)$$

trong đó

$$a = A_{11}A_{22}(A_{33} - A_T); d = \omega^6 I_{11}(I_{11}I_{22} - I_{12}^2) - \omega^4 I_{11}^2 A_{33};$$

$$b = A_{11}A_T(A_{33} - \omega^2 I_{22}) + \omega^2(I_{11}A_{22} + I_{22}A_{33})A_{11} + \omega^2 I_{11}A_{22}(A_{33} - A_T);$$

$$c = \omega^2 I_{11}[(A_{33} - \omega^2 I_{22})A_T + \omega^2(I_{11}A_{22} + I_{22}A_{33})] - \omega^4 I_{12}^2(A_{33} - A_T).$$

Gọi μ_1, μ_2, μ_3 là nghiệm của phương trình đại số bậc 3 $a\mu^3 + b\mu^2 + c\mu + d = 0$, sáu nghiệm của phương trình (14) tìm được có dạng $\lambda_{1,4} = \pm k_1; \lambda_{2,5} = \pm k_2; \lambda_{3,6} = \pm k_3, k_r = \sqrt{\mu_r}, r = 1, 2, 3$. Từ đó, dạng dao động của dầm được biểu diễn dưới dạng

$$\begin{Bmatrix} U(x) \\ \Theta(x) \\ W(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 e^{k_1 x} & \alpha_2 e^{k_2 x} & \alpha_3 e^{k_3 x} & \alpha_1 e^{-k_1 x} & \alpha_2 e^{-k_2 x} & \alpha_3 e^{-k_3 x} \\ e^{k_1 x} & e^{k_2 x} & e^{k_3 x} & e^{-k_1 x} & e^{-k_2 x} & e^{-k_3 x} \\ \beta_1 e^{k_1 x} & \beta_2 e^{k_2 x} & \beta_3 e^{k_3 x} & -\beta_1 e^{-k_1 x} & -\beta_2 e^{-k_2 x} & -\beta_3 e^{-k_3 x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ : \\ C_6 \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

trong đó $C_1, \dots, C_6$ là các hằng số và

$$\alpha_r = [\omega^2 I_{12} / (\omega^2 I_{11} + \lambda_r^2 A_{11})]; \beta_r = [\lambda_r A_{33} / (\omega^2 I_{11} + \lambda_r^2 (A_{33} - A_T))]; r = 1, 2, 3.$$

Áp dụng các điều kiện biên đối với nghiệm (15), ta xác định được các hằng số $C_1, \dots, C_6$ tương ứng, tần số dao động riêng và dạng dao động của dầm. Cụ thể, đối với dầm tựa gối đơn điều kiện biên có dạng $U(0) = W(0) = \Theta'(0) = U'(L) = W(L) = \Theta'(0) = 0$ dẫn đến phương trình

$$[\mathbf{B}_{ss}(\omega)]\{\mathbf{C}\} = \{\mathbf{0}\}, \quad (16)$$

trong đó

$$[\mathbf{B}_{SS}(\omega)] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ k_1 & k_2 & k_3 & -k_1 & -k_2 & -k_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & -\beta_1 & -\beta_2 & -\beta_3 \\ k_1\alpha_1e^{k_1L} & k_2\alpha_2e^{k_2L} & k_3\alpha_3e^{k_3L} & -k_1\alpha_1e^{-k_1L} & -k_2\alpha_2e^{-k_2L} & -k_3\alpha_3e^{-k_3L} \\ k_1e^{k_1L} & k_2e^{k_2L} & k_3e^{k_3L} & -k_1e^{-k_1L} & -k_2e^{-k_2L} & -k_3e^{-k_3L} \\ \beta_1e^{k_1L} & \beta_2e^{k_2L} & \beta_3e^{k_3L} & -\beta_1e^{-k_1L} & -\beta_2e^{-k_2L} & -\beta_3e^{-k_3L} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Để tồn tại nghiệm không tầm thường của véc tơ hằng số $\{C\}$ thì

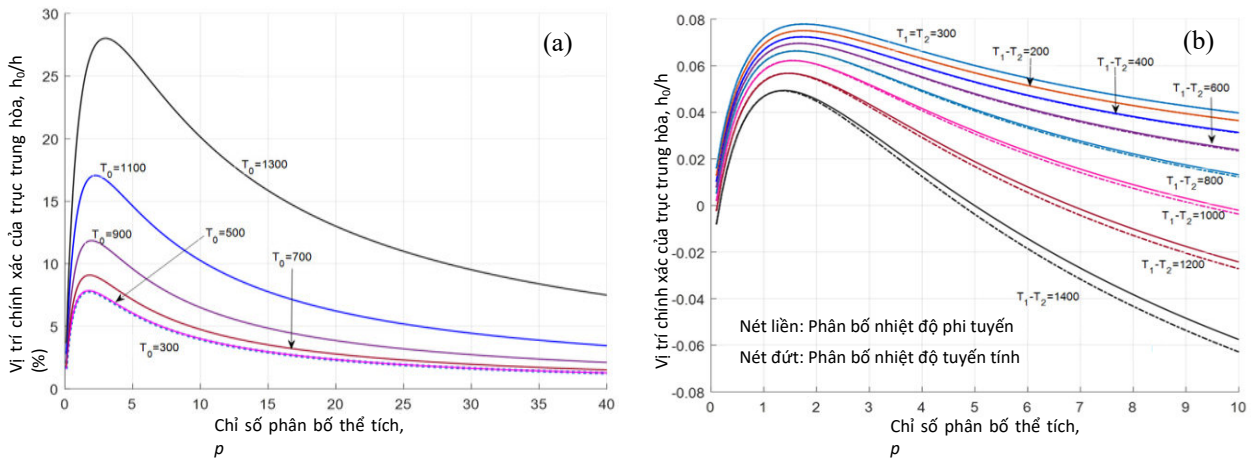
$$\det[\mathbf{B}(\omega)] = 0 \quad (18)$$

Phương trình này được gọi là phương trình tần số để xác định các tần số riêng $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ của dầm FGM. Ứng với mỗi nghiệm của phương trình (18) ta được một nghiệm của phương trình (16) cho ta một dạng dao động riêng của dầm FGM.

3. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Vị trí chính xác và ảnh hưởng của trục trung hoà

Vị trí chính xác của trục trung hoà đã được tính toán là hàm phụ thuộc vào chỉ số phân bố thể tích p cho dầm làm bằng vật liệu hai thành phần $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS304}$ cho trong hình 2. Đồ thị trong hình 2a biểu diễn vị trí chính xác của trục trung hoà phụ thuộc vào chỉ số phân bố thể tích với các nhiệt độ tham chiếu khác nhau khi trường nhiệt độ được xét là phân bố đều. Hình 2b minh họa sự thay đổi các vị trí trục trung hoà được tính toán cho phân bố nhiệt độ tuyến tính và phi tuyến. Có thể thấy rằng trục trung hoà được nâng lên khỏi trục giữa dầm khi chỉ số phân bố thể tích p tăng từ 0 đến giá trị mà trục trung hoà đạt đến vị trí cực đại. Điều này chỉ ra rằng khi thành phần vật liệu trong dầm thay đổi, từ vật liệu thuần gốm ($p = 0$) sau đó hàm lượng gốm giảm, hàm lượng kim loại tăng (p tăng) dẫn đến sự thay đổi của vị trí trục trung hoà, cụ thể là nâng lên khỏi mặt giữa của dầm. Sau đó, sau vị trí cao nhất, trục trung hoà bắt đầu hạ xuống khi chỉ số p tiếp tục tăng. Hình 2b cũng cho thấy vị trí trục trung hoà được tính toán theo phân bố nhiệt độ phi tuyến cao hơn khi tính theo phân bố nhiệt độ tuyến tính.

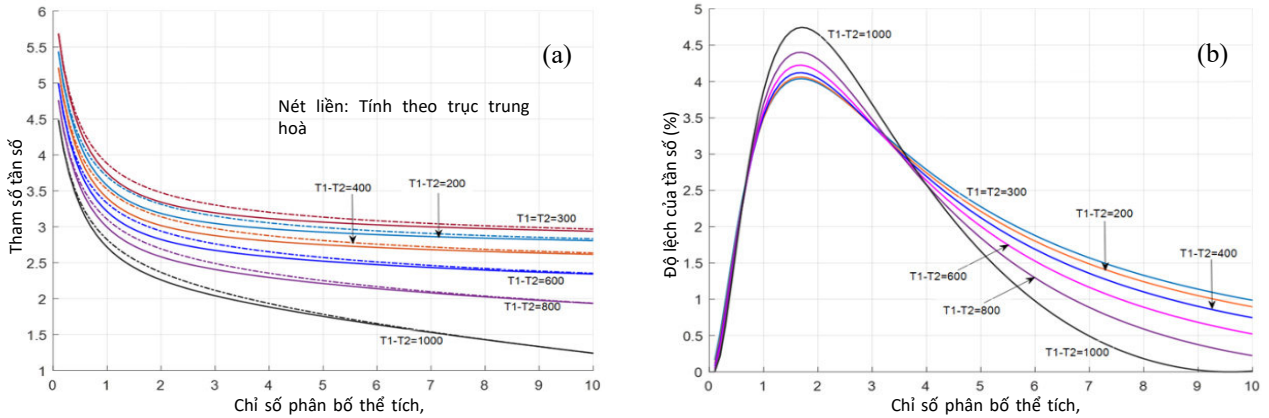


Hình 2. Vị trí chính xác của trục trung hoà phụ thuộc vào chỉ số phân bố thể tích p và chênh lệch nhiệt độ ΔT với phân bố nhiệt độ khác nhau (a) Phân bố đều; (b) Phân bố tuyến tính và phi tuyến

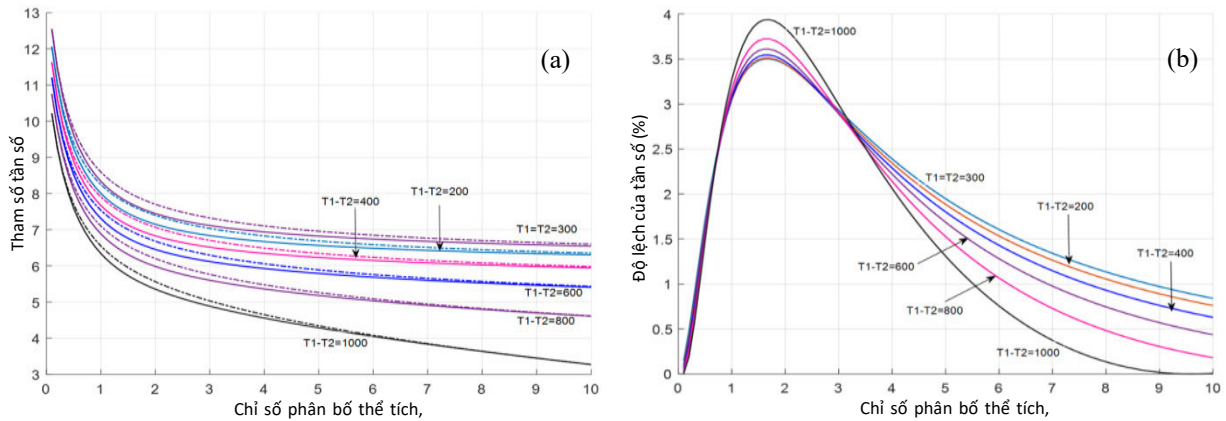
3.2. Tần số cơ bản

Ảnh hưởng của nhiệt độ và chỉ số phân bố thể tích lên tham số tần số cơ bản của dầm được nghiên cứu chi tiết trong mục này, với các tham số tần số cơ bản [3] của dầm tựa đơn và dầm ngàm hai đầu với trục trung hoà và trục giữa lần lượt là $(\bar{\omega}_{NA})$, $(\bar{\omega}_{CA})$, độ lệch tương ứng của chúng $d_2 = 100 \times (\bar{\omega}_{CA} - \bar{\omega}_{NA}) / \bar{\omega}_{NA}$ tính theo chỉ số phân bố thể tích được thể hiện trong hình 3 và hình 4.

Có thể thấy tần số được tính toán theo trục giữa lớn hơn tần số được tính toán theo trục trung hòa và sự khác biệt của chúng cũng đạt cực đại tại giá trị chỉ số phân số thể tích mà tại đó trục trung hòa ở vị trí cao nhất. Độ lệch tần số biến mất khi chênh lệch nhiệt độ lớn $\Delta T = 1000^0\text{K}$ và trục trung hòa trở nên thấp hơn so với trục giữa.

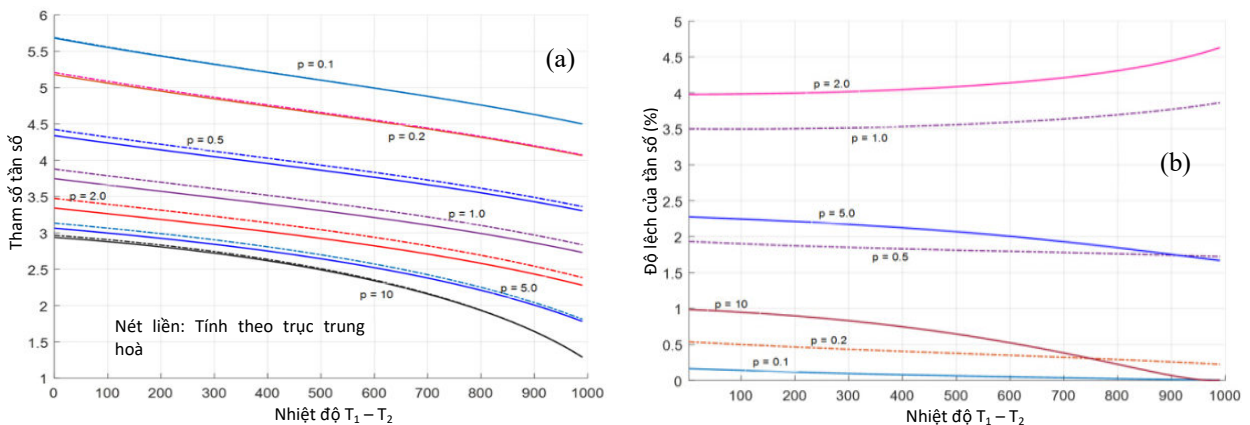


Hình 3. So sánh tần số cơ bản được tính toán với trục trung hòa và trục giữa (a) và độ lệch của chúng (b) đối với dầm tựa gjan đơn

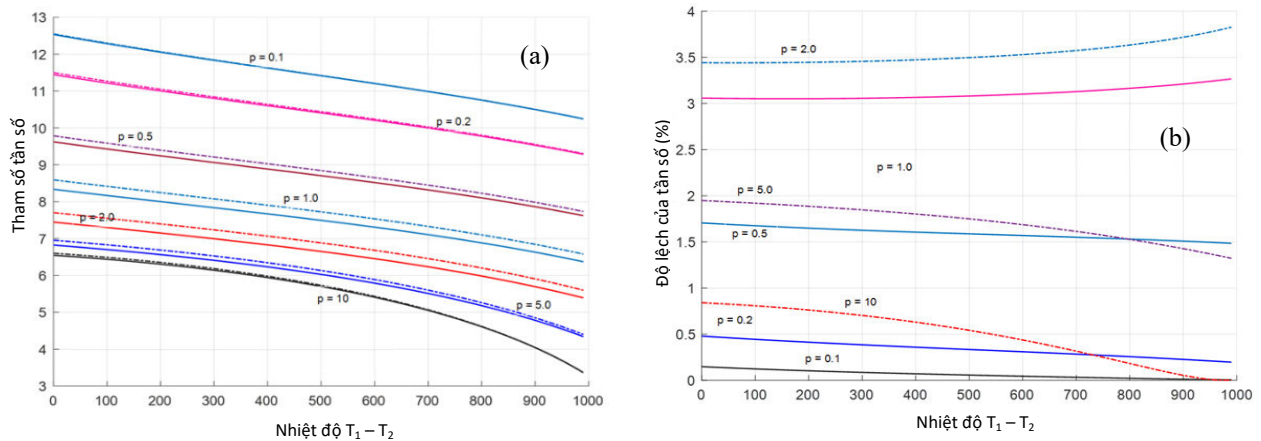


Hình 4. So sánh tần số cơ bản tính toán theo chỉ số phân bố thể tích với trục trung hòa và trục giữa (a) và độ lệch của chúng (b) đối với dầm ngàm hai đầu

Tần số được tính toán theo sự gia tăng nhiệt độ sử dụng trục trung hòa và trục giữa đối với dầm tựa gjan đơn và dầm ngàm hai đầu được trình bày trong hình 5 và hình 6. Có thể thấy rằng tần số cơ bản của dầm FGM giảm đơn điệu khi cả chỉ số phân bố thể tích và sự gia tăng nhiệt độ trên toàn bộ chiều dày dầm. Ngoài ra, chúng ta có thể thấy rằng việc tính toán chính xác vị trí của trục trung hòa thay vì trục giữa là cần thiết để tránh việc tính toán sai lệch tần số cơ bản, đặc biệt đối với dầm FGM có chỉ số phân số thể tích từ 1,0 đến 2,0 và có sự gia tăng nhiệt độ cao.



Hình 5. So sánh tần số cơ bản được tính toán theo sự tăng nhiệt độ với trục trung hoà và trục giữa dầm (a) và độ lệch của chúng (b) đối với dầm tựa gjan đơn



Hình 6. So sánh tần số cơ bản được tính toán theo sự gia tăng nhiệt độ với trục trung hoà và trục giữa dầm (a) và độ lệch của chúng (b) đối với dầm ngàm hai đầu

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, vị trí chính xác của trục trung hoà của dầm FGM Timoshenko có tính chất phụ thuộc nhiệt độ được tính toán là hàm của tham số vật liệu, phân tích ảnh hưởng của nó cũng như ảnh hưởng nhiệt đến tần số cơ bản của dầm. Phân tích số được thực hiện trong nghiên cứu này cho thấy: Sự dịch chuyển của mặt trung hoà khỏi mặt giữa dầm phụ thuộc nhiều vào chỉ số phân bố vật liệu, chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt trên cùng (giàu gốm) và bề mặt dưới cùng (giàu kim loại) và phân bố nhiệt độ trên toàn bộ chiều cao dầm. Vị trí chính xác của trục trung hoà cần phải được tính đến khi phân tích dao động của dầm FGM, đặc biệt trong trường hợp nhiệt độ thay đổi lớn hơn 1000°K và chỉ số phân bố vật liệu nằm trong khoảng từ 1 đến 3. Các kết quả này đều độc lập với các điều kiện biên của dầm, và sự phát triển lý thuyết được đề xuất trong nghiên cứu này có thể được sử dụng cho phân tích số của dầm FGM với các loại gốm và kim loại khác nhau.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Thủy lợi trong đề tài mã số CS2025-04. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã tài trợ kinh phí thực hiện đề tài.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Birman and Byrd. 2007. Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures. Applied Mechanics Reviews, 60. Pp 195-215.
- [2] Kim. 2005. Temperature dependent vibration analysis of functionally graded rectangular plates. Journal of Sound and Vibration, 284(3-5). Pp 531-549.
- [3] Nguyen Ngoc Huyen, Nguyen Tien Khiem. 2017. Modal analysis of functionally graded Timoshenko beam. Vietnam Journal of Mechanics, 39(1). Pp 31-50.
- [4] Alshorbagy. 2013. Temperature effect on the vibration characteristics of a functionally graded thick beam. Ain Shams Engineering Journal, 4(3). Pp 455-464.
- [5] Chen, Jin, Zhang, Ye and Xue. 2018. Thermal vibration of FGM beams with general boundary conditions using a higher-order shear deformation theory. Composite: Part B, 153. Pp 376-386.
- [6] Mahi, Bedia, Tounsi and Mechab. 2010. An analytical method for temperature-dependent free vibration analysis of functionally graded beams with general boundary conditions. Composite Structure, 92(8). Pp 1877-1887.
- [7] Ebrahimi, Ghasemi and Salari. 2016. Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities. Meccanica, 51. Pp 223-249.
- [8] Malekzadeh and Shojaee. 2013. Dynamic response of functionally graded beams under moving heat source. Journal of Vibration and Control, 20(6). Pp 803-814.
- [9] Mojahedin, Jabbari and Rabczuk. 2018. Thermoelastic analysis of functionally Graded Porous Beam. Journal of Thermal Stresses, 41(8). Pp 937-950.

CHẾ TẠO, LẬP TRÌNH CÁNH TAY ROBOT ĐIỀU KHIỂN BẰNG GIỌNG NÓI

Vũ Ngọc Thương

Trường Đại học Thủy lợi, email: thuongvu@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ tự động hóa và trí tuệ nhân tạo, robot điều khiển bằng giọng nói đang trở thành một xu hướng tất yếu trong các lĩnh vực như sản xuất, y tế, quốc phòng và hỗ trợ người khuyết tật. Trong đó, mô hình cánh tay robot điều khiển bằng giọng nói là một giải pháp sáng tạo, kết hợp giữa kỹ thuật cơ khí, điện tử và công nghệ nhận dạng tiếng nói, nhằm hỗ trợ thao tác từ xa một cách thuận tiện và an toàn. Bài báo này trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và lập trình cánh tay robot có khả năng thực hiện chuyển động cơ học dựa trên các lệnh giọng nói tiếng Việt. Hệ thống sử dụng vi điều khiển Arduino, module Bluetooth HC-05, động cơ servo, và được chế tạo phần cơ khí bằng công nghệ in 3D với vật liệu PETG. Giải pháp này có chi phí thấp, dễ triển khai và phù hợp với các ứng dụng trong giáo dục và nghiên cứu.

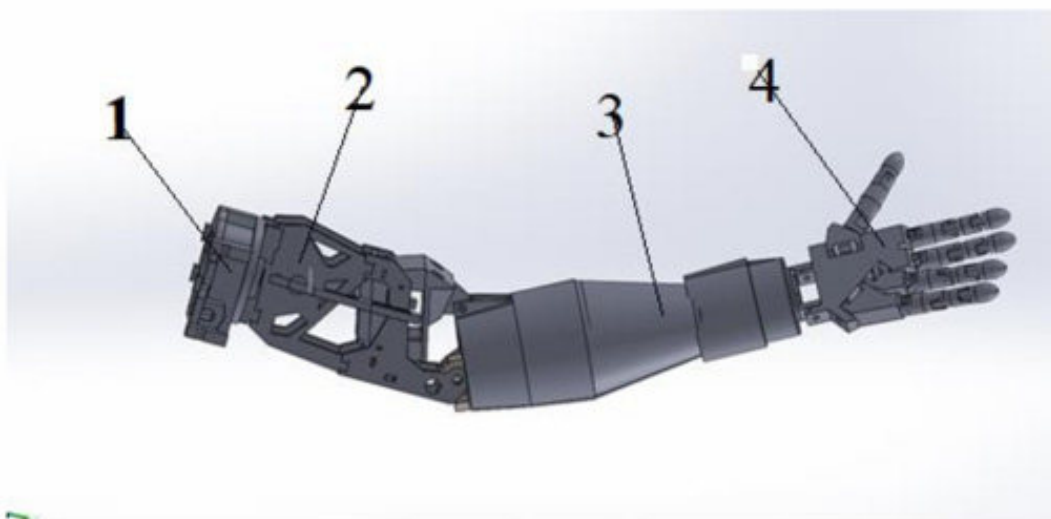
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Nghiên cứu lý thuyết

Tìm hiểu cấu trúc và nguyên lý hoạt động của cánh tay robot có nhiều bậc tự do. Nghiên cứu các công nghệ nhận dạng giọng nói trên nền tảng di động, đặc biệt là Google Speech API. Phân tích mô hình điều khiển hệ thống nhúng sử dụng Arduino để điều khiển động cơ servo qua PWM.

2.2. Thiết kế và chế tạo

Các chi tiết của robot được thiết kế bằng phần mềm SolidWorks, mô phỏng cấu trúc tay người. Cấu trúc cơ khí bao gồm các khớp: vai ($L1 = 200$ mm), khuỷu tay ($L2 = 400$ mm) và cổ tay ($L3 = 100$ mm). Các chi tiết được in bằng nhựa PETG với công nghệ in 3D FDM. Vật liệu PETG có độ bền kéo trung bình khoảng 50–53 MPa. Hệ thống sử dụng servo MG996R. Tải trọng nâng thử nghiệm đạt 0.8 kg, sau 50 chu kỳ vận hành không xuất hiện hư hỏng lớn.



1, hộp đựng trực vít; 2, xương bả vai; 3, bắp tay; 4, bàn tay.

Hình 1. Thiết kế 3D cánh tay Robot

2.3. Thiết kế mạch và lập trình điều khiển

Mạch điều khiển trung tâm sử dụng Arduino Uno. Module Bluetooth HC-05 được kết nối qua giao tiếp UART để nhận dữ liệu từ ứng dụng điện thoại. Mỗi lệnh giọng nói được mã hóa thành ký tự, sau đó Arduino giải mã và gửi tín hiệu PWM điều khiển các động cơ servo tương ứng.

2.4. Lập trình giao tiếp giọng nói

Ứng dụng Android sử dụng Google Speech-to-Text API để chuyển đổi giọng nói sang văn bản, sau đó ánh xạ văn bản thành lệnh điều khiển và gửi qua Bluetooth. Ví dụ: câu lệnh “nâng tay” được ánh xạ thành ký tự 'A' gửi đến Arduino.

2.5. Thử nghiệm và đánh giá

Hệ thống được thử nghiệm trong phòng có và không có tiếng ồn. Các yếu tố được đánh giá gồm: độ chính xác nhận dạng lệnh, độ trễ phản hồi và độ ổn định khi hoạt động liên tục trong thời gian dài.

Kết quả thử nghiệm định lượng:

- Tỷ lệ nhận dạng: 96.2% (yên tĩnh), 87.4% (quạt nền), 75.1% (nhiều người nói), 68.0% (ngoài trời).
- Độ trễ trung bình toàn hệ thống: 420 ms (nhận dạng 210 ms, truyền Bluetooth 50 ms, xử lý Arduino 2 ms, kích hoạt servo 158 ms).
- Tỷ lệ lỗi: 1.8% sai lệnh, 6.3% không phản hồi.
- Hệ thống hoạt động ổn định trong 8 giờ liên tục.

Robot thực hiện được các chuyển động: nâng/hạ tay, mở/đóng bàn tay, xoay cổ tay. Tải trọng nâng an toàn: 0.8 kg.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Giao diện và kết nối

Giao tiếp giữa điện thoại và vi điều khiển ổn định ở khoảng cách dưới 10m. Tốc độ truyền dữ liệu trung bình 50-100ms. Ứng dụng Android có giao diện đơn giản, dễ sử dụng.

3.2. Nhận dạng giọng nói và điều khiển từ xa

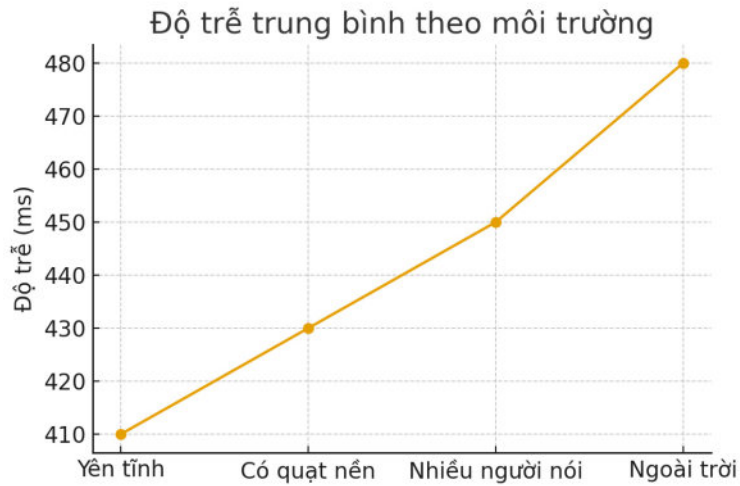
Ứng dụng trên điện thoại sử dụng công nghệ nhận dạng giọng nói để chuyển đổi câu lệnh thành mã điều khiển. Mỗi lệnh (ví dụ: “nâng tay”, “hạ tay”, “xoay cổ tay”) tương ứng với một mã ký tự được truyền đến Arduino qua Bluetooth.

3.3. Hiệu quả hoạt động

Bảng 1. Số liệu thí nghiệm mẫu

Điều kiện môi trường	Số lệnh thử	Tỷ lệ nhận dạng đúng (%)	Độ trễ trung bình (ms)	Tỷ lệ lỗi (%)
Yên tĩnh	100	96.2	410	1.8
Có quạt nền	100	87.4	430	4.2
Nhiều người nói	100	75.1	450	8.5
Ngoài trời	100	68.0	480	12.0

Bảng 1 thể hiện kết quả thí nghiệm mẫu với 100 lệnh cho mỗi điều kiện môi trường. Tỷ lệ nhận dạng và độ trễ thay đổi đáng kể theo mức độ nhiễu. Các số liệu trên có thể thay đổi khi thực hiện thí nghiệm thực tế nhiều lần.



Hình 2. Biểu đồ độ trễ trung bình của hệ thống



Hình 3. Cánh tay robot sau khi hoàn thiện

3.4. Mã điều khiển (Arduino)

Cánh tay robot với nhiều cử động phức tạp do đó phải có nhiều động cơ được lắp vào các vị trí khác nhau. Động cơ khớp vai, cánh tay, khuỷu tay, ống tay, và các động cơ điều khiển ngón tay. Chương trình được lập đáp ứng việc điều khiển linh hoạt giữa các khớp.

Code điều khiển 1 động cơ khớp khuỷu tay của robot:

```
#include <Servo.h>
Servo servo1; char cmd;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  servo1.attach(9);
  servo1.write(90);
}
void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    cmd = Serial.read();
    if (cmd == 'A') servo1.write(0);
    else if (cmd == 'B') servo1.write(90);
    else if (cmd == 'C') servo1.write(180);
  }
}
```

3.5. So sánh với phương pháp khác

So với nút bấm/joystick: ổn định, trễ thấp nhưng yêu cầu thao tác tay.

So với ứng dụng IoT (Wi-Fi): hỗ trợ từ xa, độ trễ thấp hơn Bluetooth nhưng phụ thuộc mạng.

So với giọng nói: trực quan, hands-free, phù hợp người khuyết tật, nhưng dễ nhiễu và hạn chế lệnh phức tạp.

3.6. Hạn chế

Hệ thống phụ thuộc vào độ chính xác nhận dạng giọng nói. Chưa có phản hồi vị trí servo, chỉ hỗ trợ lệnh đơn giản, chưa đa nhiệm hoặc học lệnh mới.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công nguyên mẫu cánh tay robot điều khiển bằng giọng nói tiếng Việt. Hệ thống ổn định, phản hồi nhanh, có khả năng mở rộng. Hướng phát triển:

- Tích hợp cảm biến phản hồi (encoder, cảm biến lực)
- Kết nối IoT (ESP32, Wi-Fi).
- Nâng cấp nhận dạng giọng nói bằng học máy.
- Bổ sung đa phương thức điều khiển (giọng nói + app + nút bấm).

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Đắc Lộc (2007), Sổ tay công nghệ chế tạo máy, NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [2] Trần Văn Địch (2000), Thiết kế đồ án công nghệ chế tạo máy, NXB KHKT.
- [3] Nguyễn Văn Ôn (2003), Sức bền vật liệu, NXB Giáo dục.
- [4] Arduino Official Documentation – <https://www.arduino.cc>
- [5] SolidWorks Tutorial – Dassault Systèmes.
- [6] Elechouse Voice Recognition Module – Datasheet.
- [7] Google Speech-to-Text API – <https://cloud.google.com/speech-to-text>
- [8] Review of Voice Controlled Robotic Arm, EJECE, 2023.
- [9] Development of a Voice Controlled Robotic Arm, arXiv, 2023.
- [10] Incorporating Noise Robustness in Speech Command Recognition, PMC, 2021.

TỐI ƯU HỆ SỐ CẢN NHỚT CỦA GIẢM CHẤN HỆ THỐNG TREO BẰNG THUẬT TOÁN BẦY ĐÀN (PSO)

Nguyễn Đức Ngọc, Nguyễn Ngọc Trâm, Đặng Ngọc Duyên, Nguyễn Tuấn Anh

Trường Đại học Thủy lợi, email: ndn@thu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hệ thống treo được xem là một trong những thành phần vô cùng quan trọng trên ô tô với ba chức năng chính, bao gồm: điều hòa dao động, dập tắt dao động, truyền lực và mô men tương tác giữa khung xe và bánh xe [1]. Để cải thiện độ êm dịu cho hành khách, giữa vị trí ghế ngồi và sàn xe được trang bị thêm một hệ thống treo phụ (được gọi là hệ thống treo ghế ngồi) [2].

Dao động của xe được đánh giá thông qua cả chuyển vị, gia tốc và tần số dao động, trong khi độ êm dịu thì chủ yếu liên quan đến gia tốc của ghế ngồi và gia tốc của khối lượng được treo (thân xe). Ngày nay, có nhiều phương pháp được sử dụng để cải thiện dao động của xe. Một trong số đó chính là trang bị hệ thống treo khí nén thích nghi [3], treo chủ động với cơ cấu chấp hành thủy lực [4] hoặc bán chủ động điều khiển giảm chấn [5]. Tuy nhiên, việc sử dụng các hệ thống treo có khả năng điều khiển kể trên đều làm tăng chi phí sản xuất, chỉ phù hợp cho các dòng xe du lịch cao cấp.

Để làm giảm chi phí đầu tư ban đầu trong khi vẫn đảm bảo sự ổn định và tiện nghi cho người sử dụng, hệ thống treo bị động nói chung nên được thiết kế tối ưu với độ cứng lò xo và hệ số cản nhớt giảm chấn lý tưởng. Cụ thể hơn, hệ số độ cứng và độ nhớt lý tưởng được hiểu là giá trị giúp tối ưu dao động của hệ thống treo. Trong [6], tác giả Lê Văn Quỳnh và cộng sự đã trình bày về việc tối ưu các thông số hệ thống treo dựa trên hàm mục tiêu với gia tốc bình phương trung bình. Tuy nhiên, họ không trình bày cụ thể về phương pháp tối ưu. Trong [7], Nguyen và cộng sự đã giới thiệu phương pháp tính toán nhằm tối thiểu hóa góc nghiêng và gia tốc góc của thân xe dựa trên các đường cong đặc tính phụ thuộc vào độ cứng lò xo. Một công việc liên quan đến tối ưu độ bền mỏi của lò xo đã được trình bày trong [8] bởi Kong và cộng sự.

Nhìn chung, số lượng các nghiên cứu về tối ưu độ cứng của hệ thống treo vẫn còn hạn chế, thường chỉ tập trung vào việc xem xét ảnh hưởng của độ cứng lò xo. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất việc ứng dụng phương pháp tính toán tối ưu dựa trên cơ chế bầy đàn (PSO) để tìm ra hệ số cản nhớt lý tưởng cho giảm chấn hệ thống treo. Mục tiêu của nghiên cứu này hướng tới việc làm giảm gia tốc bình phương trung bình (RMS) của ghế ngồi, nhằm cải thiện độ êm dịu cho hành khách.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Mục này trình bày về mô hình động lực học của hệ thống treo và phương pháp tính toán tối ưu.

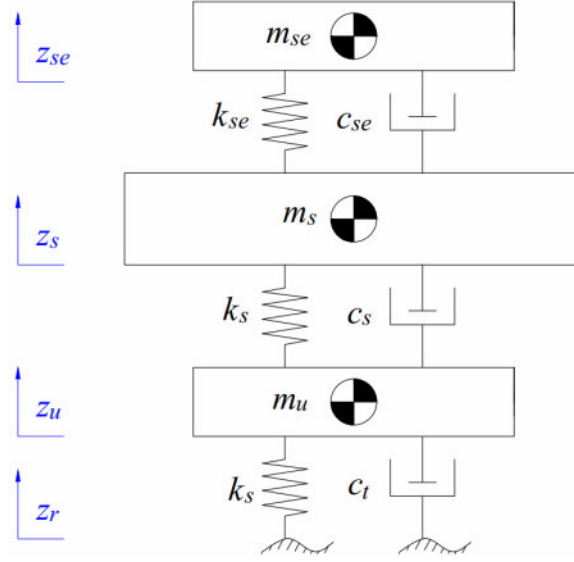
2.1. Mô hình hệ thống treo

Xét một mô hình động lực học hệ thống treo có kể đến ghế ngồi như trên Hình 1. Áp dụng nguyên lý D'Alembert cho hệ nhiều vật, thu được các phương trình (1), (2) và (3). Các ký hiệu được sử dụng bao gồm m_{se} là khối lượng của ghế (bao gồm cả người ngồi), z_{se} là chuyển vị của ghế, m_s là khối lượng được treo, z_s là chuyển vị của khối lượng được treo, m_u là khối lượng không được treo, z_u là chuyển vị của khối lượng không được treo.

$$m_{se}\ddot{z}_{se} = F_{kse} + F_{cse} \quad (1)$$

$$m_s\ddot{z}_s = F_{ks} + F_{cs} - F_{kse} - F_{cse} \quad (2)$$

$$m_u\ddot{z}_u = F_{kt} + F_{ct} - F_{ks} - F_{cs} \quad (3)$$



Hình 1. Mô hình hệ thống treo ghế ngồi với 3 bậc tự do

Lực đàn hồi của ghế (F_{kse}) và lực giảm chấn của ghế (F_{cse}) được tính toán theo (4) và (5), trong đó k_{se} là độ cứng lò xo ghế và c_{cs} là hệ số cản nhớt của giảm chấn ghế.

$$F_{kse} = k_{se} (z_s - z_{se}) \quad (4)$$

$$F_{cse} = c_{se} (\dot{z}_s - \dot{z}_{se}) \quad (5)$$

Tương tự, lực đàn hồi (F_{ks}) và lực cản giảm chấn (F_{cs}) của hệ thống treo được xác định theo (6) và (7). Các lực của lớp (F_{kt} và F_{ct}) được tính toán trong (8) và (9). Trong đó, k_s đại diện cho độ cứng lò xo hệ treo, c_s đại diện cho hệ số cản nhớt hệ treo, k_t đại diện cho độ cứng lớp và c_t đại diện cho khả năng giảm chấn của lớp.

$$F_{ks} = k_s (z_u - z_s) \quad (6)$$

$$F_{cs} = c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) \quad (7)$$

$$F_{kt} = k_t (z_r - z_u) \quad (8)$$

$$F_{ct} = c_t (\dot{z}_r - \dot{z}_u) \quad (9)$$

2.2. Thuật toán bầy đàn (PSO)

Hệ số độ cứng (k) và hệ số cản nhớt (c) có ảnh hưởng quan trọng tới dao động của thân xe, đặc biệt là vị trí ghế ngồi. Nếu hệ số độ cứng và cản nhớt quá lớn, gia tốc theo phương thẳng đứng có thể tăng lên, gây mất êm dịu chuyển động. Ngược lại, nếu các giá trị này quá nhỏ sẽ khiến cho biên độ dao động tăng lên và gây ra dao động kéo dài, ảnh hưởng đến sự tiện nghi và thoải mái của hành khách. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng thuật toán bầy đàn (PSO) để tính toán tối ưu hệ số cản nhớt của giảm chấn hệ thống treo (c_s) dựa trên mục tiêu tối thiểu hóa gia tốc bình phương trung bình (RMS) của ghế ngồi.

Hệ số cản nhớt của giảm chấn hệ treo (c_s) được quy đổi về biến x trong quá trình tính toán. Khoảng giá trị khảo sát được giới hạn trong $(x_{min}; x_{max})$. Hàm mục tiêu (J) được đề xuất trong (10) theo chỉ tiêu RMS với T là thời gian mô phỏng. Trên thực tế, độ êm dịu của ghế ngồi thường được đánh giá theo sự thay đổi của gia tốc bình phương trung bình trong một khoảng thời gian nhất định, phù hợp với tiêu chuẩn ISO-2631-1-1997. Với mục tiêu tối thiểu hóa hàm $J(c_s)$ để đạt độ êm dịu tốt nhất, gia tốc RMS sẽ là nhỏ nhất khi c_s được lựa chọn tối ưu.

$$J(c_s) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \ddot{z}_3^2(t) dt} \quad (10)$$

Mỗi hạt trong PSO biểu diễn cho một giá trị tương ứng của c_s (tức là một vị trí của x). Tại một thời điểm t (được ký hiệu trên đầu của vector vị trí và vận tốc), trạng thái của hạt thứ i bao gồm vị trí (x) và vận tốc (v) $\in \mathfrak{R}$. Phương trình (11) mô tả quy tắc cập nhật vận tốc của mỗi hạt trong PSO, giúp cho các hạt dịch chuyển trong không gian tìm kiếm, tức là thay đổi các giá trị thử của độ cứng c_{si} tương ứng với biến x_i tại các thời điểm t khác nhau. Phương trình (12) cập nhật vị trí tương ứng với giá trị mới của c_s từ vận tốc vừa tính trong (11). Trong đó, w là hệ số quán tính, a_1 là hệ số nhận thức, a_2 là hệ số xã hội, r_1 và r_2 là các hằng số ngẫu nhiên, p_i là vị trí tốt nhất của hạt thứ i và g là vị trí tốt nhất toàn cục của đàn.

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + a_1r_1(p_i^t - x_i^t) + a_2r_2(g^t - x_i^t) \quad (11)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (12)$$

Trong mỗi vòng lặp, PSO sẽ sinh ra một giá trị c_s mới dựa trên (11) và (12) rồi tiến hành đánh giá chất lượng theo (10). Giá trị hội tụ chính là hệ số cản nhót tối ưu.

Các bước tính toán được thực hiện theo trình tự sau:

- + Bước 1: Xác định số hạt (n) và số vòng lặp tối đa (Max_{it}).
- + Bước 2: Khởi tạo ngẫu nhiên vị trí của x nằm trong khoảng xác định ban đầu với vận tốc $v = 0$.
- + Bước 3: Gán vị trí tốt nhất của cá nhân $p_i = x_i$ và toàn cục g , tương ứng với hạt có $J_{\min}$.
- + Bước 4: Lặp lại quá trình tính toán qua từng vòng, bao gồm: cập nhật vị trí và vận tốc mới, đánh giá hàm mục tiêu mới, cập nhật lại p_i và g .
- + Bước 5: Dừng thuật toán (sau khi đã hoàn thành xong số vòng lặp hoặc hội tụ).

3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

Quá trình mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm MATLAB-Simulink để tìm ra giá trị tối ưu của hệ số cản nhót hệ thống treo. Các thông số kỹ thuật của xe được trình bày trong Bảng 1, trong đó hệ số giảm chấn lốp (c_t) được xem là xấp xỉ không. Có hai giá trị đề xuất (c_{s1} và c_{s2}) được sử dụng để so sánh với c_s được tính toán tối ưu bằng PSO.

Kích thích mặt đường (z_r) được cho bởi một hàm bước theo (13). Trong trường hợp thứ nhất, $h = 50$ mm và $t_0 = 0,5$ s. Ở trường hợp thứ hai, $h = 70$ mm và $t_0 = 1$ s. Quá trình tính toán tối ưu cho ra kết quả $c_s = 2655$ Ns/m. Giá trị này sẽ được so sánh với hai giá trị đề xuất trong Bảng 1.

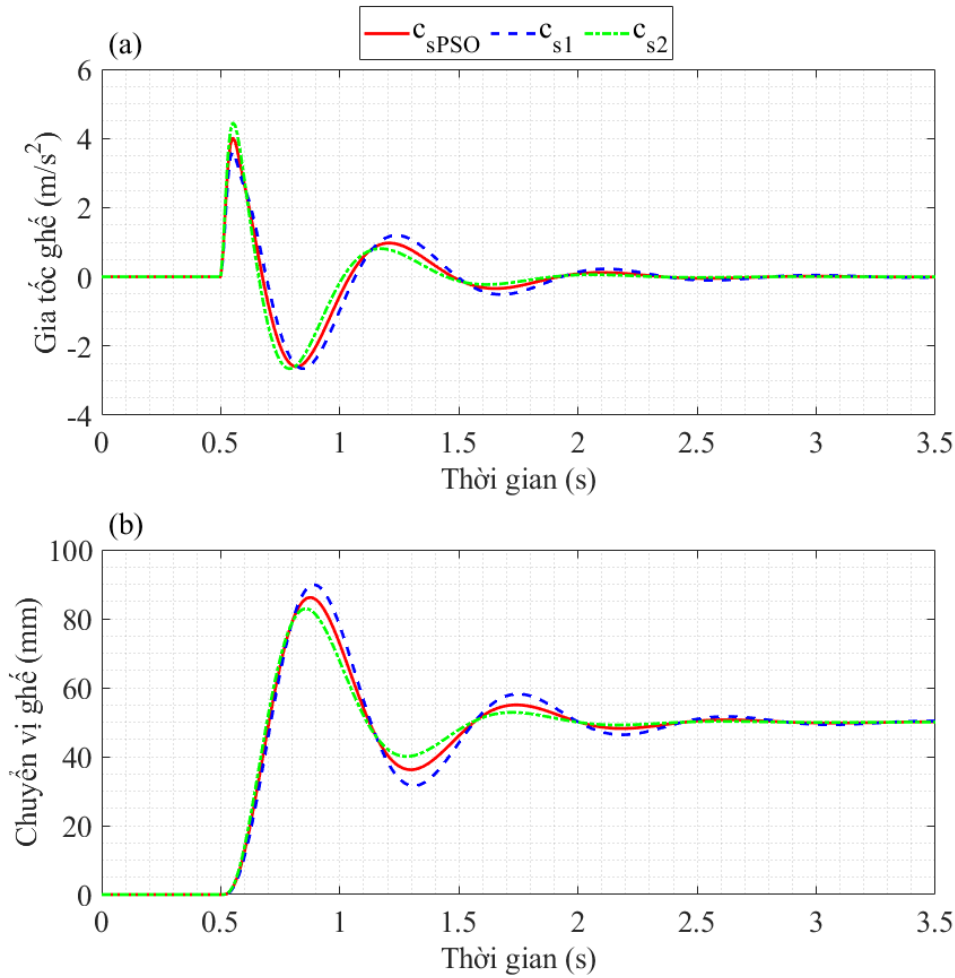
$$z_r = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ h & t \geq t_0 \end{cases} \quad (13)$$

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của xe tham khảo

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
m_{se}	70	kg	c_{se}	600	Ns/m
m_s	300	kg	c_t	~ 0	Ns/m
m_u	30	kg	k_{se}	7000	N/m
c_{s1}	2000	Ns/m	k_s	28000	N/m
c_{s2}	3500	Ns/m	k_t	160000	N/m

3.1. Trường hợp khảo sát thứ nhất

Trong trường hợp thứ nhất, kích thích dạng bước với biên độ 50 mm được sử dụng. Kết quả mô phỏng được minh họa trên Hình 2. Nhìn vào Hình 2a có thể nhận thấy gia tốc ghế tăng đột ngột đến giá trị cực đại sau đó giảm dần trong một vài chu kỳ và tiến đến không. Điều này có được nhờ vào đặc tính dập tắt dao động của giảm chấn ghế ngồi và giảm chấn hệ thống treo. Kết quả tính toán cho thấy gia tốc RMS của ghế ngồi ứng với c_{s1} và c_{s2} đều bằng $0,870 \text{ m/s}^2$ (kết quả đã được làm tròn), trong khi giá trị đỉnh của gia tốc thu được từ c_{s2} thì lớn hơn c_{s1} . Một khi sử dụng hệ thống treo có độ nhót giảm chấn được tính toán tối ưu bằng PSO, giá trị RMS của gia tốc ghế giảm còn $0,853 \text{ m/s}^2$.



Hình 2. Kết quả mô phỏng trong trường hợp thứ nhất:
(a) Gia tốc ghế ngồi; (b) Chuyển vị ghế ngồi

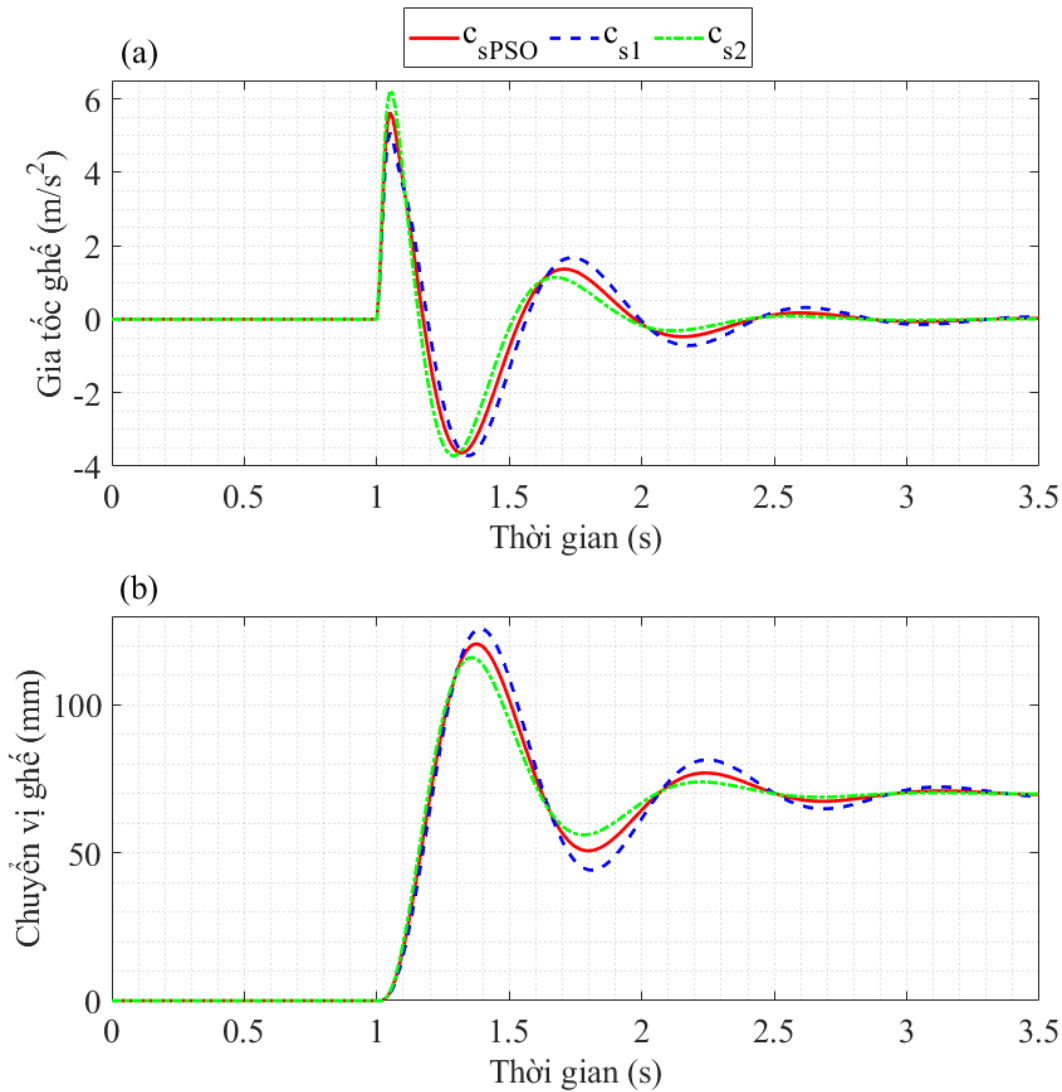
Xem xét về ý nghĩa vật lý, việc giảm giá trị RMS của gia tốc ghế đồng nghĩa với việc làm giảm năng lượng dao động truyền từ mặt đường qua hệ thống treo và ghế ngồi đến hành khách. Điều này giúp cho hành khách cảm nhận ít rung động hơn, giảm mệt mỏi khi di chuyển trên quãng đường dài. Giá trị hệ số cản nhớt tối ưu **tìm được thông qua PSO** đảm bảo sự cân bằng: đủ lớn để nhanh chóng dập tắt dao động nhưng không làm tăng giá trị của gia tốc. Nhờ đó, hệ thống treo vừa cải thiện độ êm dịu vừa duy trì sự ổn định tổng thể của xe.

Hình 2b cung cấp thông tin về sự thay đổi của chuyển vị ghế ngồi theo thời gian. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị cực đại của chuyển vị tương ứng với c_{s1} là lớn nhất, đối lập so với kết quả gia tốc. Điều này hoàn toàn phù hợp với dao động thực tế của hệ thống treo ô tô.

3.2. Trường hợp khảo sát thứ hai

Biên độ kích thích từ mặt đường được tăng lên thành 70 mm trong trường hợp khảo sát thứ hai. Sự thay đổi của chuyển vị và gia tốc ghế ngồi được minh họa trong Hình 3. Theo Hình 3a, độ cứng lớn hơn (c_{s2}) khiến cho gia tốc tăng lên. Đồng thời, quá trình dập tắt dao động sẽ diễn ra nhanh hơn. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị RMS của gia tốc ghế ngồi đã giảm từ 1,218 m/s^2 còn 1,194 m/s^2 khi mà sử dụng giảm chấn có độ cản nhớt tối ưu.

Tương tự như trường hợp khảo sát thứ nhất, chuyển vị của ghế ngồi (Hình 3b) trong trường hợp thứ hai là lớn nhất khi mà hệ thống treo sử dụng có hệ số cản nhớt thấp (c_{s1}), khiến cho giá trị RMS của chuyển vị tăng lên đến 62,368 mm. Ngược lại, hệ số cản nhớt cao (c_{s2}) khiến cho chuyển vị thân xe giảm xuống và cải thiện thời gian dập tắt dao động nhưng gây ra gia tốc lớn hơn (Hình 3a). Việc sử dụng giảm chấn có hệ số cản nhớt lý tưởng (được tính toán thông qua phương pháp PSO) giúp tối ưu dao động của ghế ngồi thông qua việc làm giảm giá trị RMS của gia tốc, đồng thời đảm bảo cho chuyển vị thân xe không quá lớn.



Hình 3. Kết quả mô phỏng trong trường hợp thứ hai:
(a) Gia tốc ghế ngồi; (b) Chuyển vị ghế ngồi

So với thuật toán di truyền (GA), tối ưu bằng PSO giúp quá trình hội tụ nhanh hơn mà không yêu cầu nhiều thể hệ tính toán trong khi số lượng tham số cũng được giảm bớt [9]. Mặc dù DE có khả năng cân bằng tốt giữa tốc độ và khả năng tìm kiếm nghiệm toàn cục [10], xong cấu trúc tính toán khá phức tạp và tốc độ hội tụ dễ bị ảnh hưởng bởi việc lựa chọn tham số. So với PSO, tốc độ tính toán của thuật toán bầy kiến (ACO) khá chậm, chỉ phù hợp cho các bài toán rời rạc kiểu tổ hợp [11], không tương thích với các nhiệm vụ tính toán tối ưu độ cứng và độ nhớt hệ treo.

4. KẾT LUẬN

Độ êm dịu của ghế ngồi phụ thuộc vào sự thay đổi của gia tốc theo thời gian. Trong công việc này, nhóm tác giả đã đề xuất một phương pháp tính toán tối ưu dựa trên cơ chế bầy đàn để xác định hệ số cản nhớt lý tưởng cho giảm chấn hệ thống treo. Kết quả tính toán cho thấy giá trị RMS của gia tốc ghế ngồi đã giảm đáng kể so với hai ngưỡng độ nhớt đề xuất (cao hơn và thấp hơn so với giá trị lý tưởng). Điều này mang lại tiềm năng trong việc thiết kế các hệ thống treo tối ưu nhằm nâng cao sự ổn định và êm dịu cho xe.

Công việc này mới chỉ tiến hành xác định hệ số cản nhớt tối ưu cho giảm chấn hệ thống treo trong một trường hợp duy nhất, trong khi độ cứng của lò xo được coi là biết trước. Đồng thời, ảnh hưởng của tải trọng thay đổi và bất định tham số không được xem xét trong quá trình tính toán. Trong các công việc tiếp theo, nhóm tác giả sẽ mở rộng và phát triển hướng nghiên cứu liên quan đến tối ưu đồng thời cả hai tham số của hệ treo.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Đức Ngọc, Bùi Đức Tiến, Đặng Ngọc Duyên, Nguyễn Tuấn Anh. 2023. Giáo trình Cấu tạo ô tô (tập 2). Nhà xuất bản Bách Khoa Hà Nội.
- [2] Lê Văn Quỳnh. 2017. Đánh giá hiệu quả hệ thống treo ghế ngồi người điều khiển của máy xây dựng bằng một phương pháp thí nghiệm. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Thái Nguyên, tập 169, số 9, tr. 195–199.
- [3] Lưu Đức Lịch, Ngô Sĩ Đồng. 2024. Nghiên cứu khả năng giảm tải trọng động của hệ thống treo khí nén trên xe tải hạng nặng. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Thái Nguyên, tập 229, số 10, tr. 142–149.
- [4] Trần Thị Thu Hương, Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Mạnh Long. 2022. Mô phỏng dao động của hệ thống treo chủ động có xét đến sự ảnh hưởng của cơ cấu chấp hành thủy lực. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Đà Nẵng, tập 20, số 5, tr. 23–26.
- [5] Vũ Hải Quân và cộng sự. 2023. So sánh hiệu suất làm việc hệ thống treo bán chủ động sử dụng giảm chấn từ hóa MR và treo bị động cho mô hình 1/4 xe. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội, tập 59, số 5, tr. 82–87.
- [6] Lê Văn Quỳnh. 2017. Tối ưu thông số thiết kế hệ thống treo cabin và ghế ngồi người điều khiển của xe tải hạng nặng. Tạp chí Khoa học và Công nghệ – Đại học Thái Nguyên, tập 169, số 9, tr. 183–188.
- [7] N. T. Nguyen, et al. 2025. An optimal method for calculating suspension spring stiffness based on roll angle and roll acceleration values. Journal of Physics: Conference Series, vol. 2949.
- [8] Y. S. Kong, et al. 2019. Determining optimal suspension system parameters for spring fatigue life using design of experiment. Mechanics and Industry, vol. 20, no. 6.
- [9] A. C. Mitra, et al. 2016. Optimization of passive vehicle suspension system by genetic algorithm, Procedia Engineering vol. 144, pp. 1158–1166.
- [10] M. F. Ahmad, et al. 2022. Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works, Alexandria Engineering Journal, vol. 61, pp. 3831–3872.
- [11] S. Manna, et al. 2022. Ant colony optimization tuned closed-loop optimal control intended for vehicle active suspension system, IEEE Access, vol. 10, pp. 53735–53745.

XÁC ĐỊNH MA TRẬN THAM SỐ NỘI TẠI VÀ MA TRẬN THAM SỐ NGOẠI CỦA CAMERA BẰNG BIẾN ĐỔI TUYẾN TÍNH TRỰC TIẾP

Nguyễn Tuấn Anh

Trường Đại học Thủy lợi, email: tuananh.nguyencdt@tlu.edu.vn

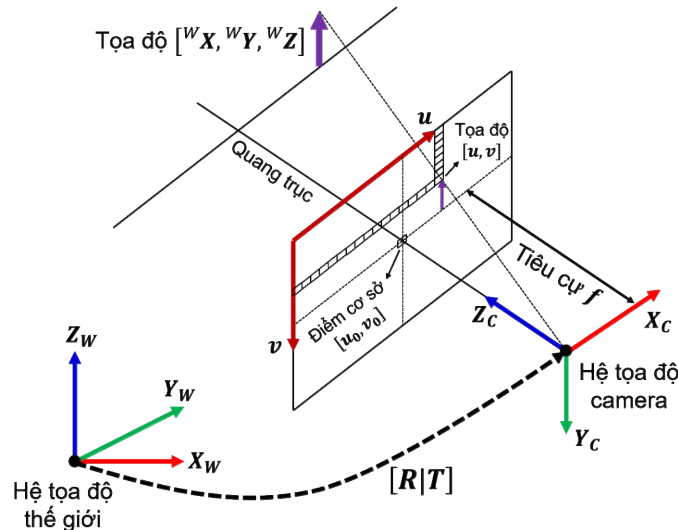
1. GIỚI THIỆU CHUNG

Với sự tiện lợi và chất lượng ngày càng được nâng cao, camera không chỉ phục vụ cho các tác vụ xử lý ảnh truyền thống như phát hiện, nhận dạng đối tượng, ... mà còn được sử dụng trong các lĩnh vực tương tác với thế giới 3D như định vị trí, xây dựng bản đồ, Do đó, việc xác định ma trận tham số nội tại và ma trận tham số ngoại, hay bài toán hiệu chỉnh camera, trở nên vô cùng quan trọng bởi các ma trận này giúp cho người sử dụng xây dựng được mối quan hệ giữa không gian ba chiều và hình ảnh hai chiều thu được từ camera, góp phần lớn vào độ chính xác trong các ứng dụng đo khoảng cách, xác định tọa độ, dựng bản đồ 3D. Hiện nay, có nhiều phương pháp đã và đang được phát triển để hiệu chỉnh camera như biến đổi tuyến tính trực tiếp Direct Linear Transform [1], phương pháp của Zhang [2] hay Bundle Adjustment [3]. Phương pháp biến đổi tuyến tính trực tiếp được sử dụng trong nghiên cứu này do các ưu điểm đơn giản, hiệu chỉnh nhanh. Đối tượng camera được hiệu chỉnh trong nghiên cứu là camera tiêu chuẩn và không xét đến hiện tượng biến dạng ống kính (radial distortion). Sau quá trình tính toán, các dữ liệu hiệu chỉnh camera được đánh giá so sánh, và đặc biệt ma trận tham số ngoại được kiểm chứng với dữ liệu thu thập trên robot, để từ đó đề xuất các phương hướng nhằm nâng cao độ chính xác cho quá trình hiệu chỉnh.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp biến đổi tuyến tính trực tiếp

2.1.1. Mô hình camera



Hình 1. Mô hình camera sử dụng trong nghiên cứu

Mô hình camera được xem xét trong nghiên cứu này là mô hình camera lỗ kim tiêu chuẩn [4]. Xét điểm có tọa độ $[^wX, ^wY, ^wZ]$ trong hệ tọa độ toàn cục W , điểm này xuất hiện tại pixel có tọa độ $[u, v]$ (vị trí cột, hàng) trên ảnh của camera (hình 1). Khi đó, mối liên hệ giữa tọa độ 3D và tọa độ 2D của điểm này được mô tả bởi phương trình sau:

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^W X \\ {}^W Y \\ {}^W Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \lambda \cdot \mathbf{p} = \mathbf{K} \cdot [\mathbf{R} | \mathbf{T}] \cdot {}^W \mathbf{P}$$

$$\Leftrightarrow \lambda \cdot \mathbf{p} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot [\mathbf{I} | -\mathbf{T}_0] \cdot {}^W \mathbf{P} \quad (1)$$

Ma trận tham số nội tại (Intrinsic Parameter Matrix) $\mathbf{K}$ bao gồm các giá trị tiêu cự α_x và α_y , quyết định đến mức độ phóng đại, hệ số s mô tả độ vuông góc giữa các trục, các giá trị u_0, v_0 là tọa độ điểm cơ sở trên ảnh (principle point). Ma trận tham số ngoại (Extrinsic Parameters Matrix), $[\mathbf{R} | \mathbf{T}]$ hay $\mathbf{R} \cdot [\mathbf{I} | -\mathbf{T}_0]$, bao gồm trong đó là $\mathbf{R}$ - ma trận quay từ hệ tọa độ toàn cục W sang hệ tọa độ camera, $\mathbf{T}_0$ - vector vị trí gốc tọa độ camera trong hệ tọa độ W. Trong các ứng dụng phức tạp như định vị, xây dựng bản đồ 3D từ dữ liệu của camera, các hệ số của các ma trận này đều đóng vai trò quyết định tới độ chính xác: ma trận K có ảnh hưởng quyết định tới việc tính toán kích thước, khoảng cách và chuyển đổi giữa không gian 2D-3D; các ma trận tham số ngoại như $\mathbf{R}$ và $\mathbf{T}_0$ cho phép xây dựng quỹ đạo chuyển động của camera trong không gian và tạo liên kết các dữ liệu ảnh. Do đó, việc xác định chính xác các ma trận này đóng góp một phần rất lớn vào kết quả đầu ra trong các lĩnh vực này.

2.1.2. Nội dung phương pháp

Phương pháp biến đổi tuyến tính trực tiếp DLT trong [1] được sử dụng như sau: áp dụng phương trình (1) cho điểm thứ i của bộ dữ liệu:

$$\lambda_i \cdot \mathbf{p}_i = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot [\mathbf{I} | -\mathbf{T}_0] \cdot {}^W \mathbf{P}_i \Leftrightarrow \lambda_i \cdot \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \cdot {}^W \mathbf{P}_i$$

Với $\mathbf{p}_i$ và ${}^W \mathbf{P}_i$ lần lượt là tọa độ 2D và 3D của điểm thứ i trong bộ dữ liệu.

Đặt $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T \\ \mathbf{m}_2^T \\ \mathbf{m}_3^T \end{bmatrix}$ với $\mathbf{m}_1 = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \end{bmatrix}; \mathbf{m}_2 = \begin{bmatrix} m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \end{bmatrix}; \mathbf{m}_3 = \begin{bmatrix} m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix}$. Khi đó:

$$\lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T \\ \mathbf{m}_2^T \\ \mathbf{m}_3^T \end{bmatrix} \cdot {}^W \mathbf{P}_i \Rightarrow \begin{cases} \lambda_i u_i = \mathbf{m}_1^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i \\ \lambda_i v_i = \mathbf{m}_2^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i \\ \lambda_i = \mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\lambda_i u_i}{\lambda_i} = \frac{\mathbf{m}_1^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i}{\mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i} \\ \frac{\lambda_i v_i}{\lambda_i} = \frac{\mathbf{m}_2^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i}{\mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_i = \frac{\mathbf{m}_1^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i}{\mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i} \\ v_i = \frac{\mathbf{m}_2^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i}{\mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \mathbf{m}_1^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i - u_i \cdot \mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i = 0 \\ \mathbf{m}_2^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i - v_i \cdot \mathbf{m}_3^T \cdot {}^W \mathbf{P}_i = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} {}^W \mathbf{P}_i^T \cdot \mathbf{m}_1 - u_i \cdot {}^W \mathbf{P}_i^T \cdot \mathbf{m}_3 = 0 \\ {}^W \mathbf{P}_i^T \cdot \mathbf{m}_2 - v_i \cdot {}^W \mathbf{P}_i^T \cdot \mathbf{m}_3 = 0 \end{cases}$$

Khi đó:

$$\begin{bmatrix} {}^W \mathbf{P}_i^T & \mathbf{0}^T & -u_i \cdot {}^W \mathbf{P}_i^T \\ \mathbf{0}^T & {}^W \mathbf{P}_i^T & -v_i \cdot {}^W \mathbf{P}_i^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \mathbf{m}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{xi}^T \\ \mathbf{a}_{yi}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \mathbf{m}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Áp dụng phương trình (2) lên các điểm dữ liệu và kết hợp các phương trình này với nhau thu được:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{x1}^T \\ \mathbf{a}_{y1}^T \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{xN}^T \\ \mathbf{a}_{yN}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \mathbf{m}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{Q} \cdot \tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{0} \quad (3)$$

Hệ phương trình (3) là hệ phương trình tuyến tính thuần nhất với biến cần tìm là vector $\tilde{\mathbf{M}} = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ m_{21} \ m_{22} \ m_{23} \ m_{24} \ m_{31} \ m_{32} \ m_{33} \ m_{34}]^T$ và ma trận $\mathbf{Q}$ được xác định từ dữ liệu tọa độ 2D-3D của các điểm. Để giải hệ phương trình dạng này, phương pháp được sử dụng là phép phân tích giá trị suy biến SVD (Singular Value Decomposition) lên ma trận $\mathbf{Q}$, khi đó có thể tách ma trận này thành 3 ma trận có dạng như sau: $\mathbf{Q} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T$. Khi đó, lời giải của hệ phương trình (3) là vector cuối cùng trong ma trận $\mathbf{V}$, từ đây thu được giá trị cho ma trận $\mathbf{M}$. Giai đoạn tiếp theo là phân rã ma trận $\mathbf{M}$ thành các ma trận $\mathbf{K}$, $\mathbf{R}$ và vector $\mathbf{T}_0$. Từ (1), có:

$$\mathbf{M} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot [\mathbf{I} \mid -\mathbf{T}_0] = \begin{array}{c|c} \overbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}}^{M_1} & \overbrace{\begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \\ m_{34} \end{bmatrix}}^{M_2} \\ \hline & \underbrace{\begin{bmatrix} m_{14} \\ m_{24} \\ m_{34} \end{bmatrix}}_{-\mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}_0} \end{array} \quad (5)$$

Theo (5), cần tách ma trận $\mathbf{M}$ thành hai phần: ma trận $\mathbf{M}_1$ là ba vector cột đầu tiên và vector $\mathbf{M}_2$ là cột thứ bốn của ma trận $\mathbf{M}$, khi đó:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_1 = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \\ \mathbf{M}_2 = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{T}_0 \end{cases} \Rightarrow \mathbf{T}_0 = -\mathbf{M}_1^{-1} \cdot \mathbf{M}_2 \quad (6)$$

Theo phương trình (1), ma trận $\mathbf{K}$ là ma trận đường tam giác trên, $\mathbf{R}$ là ma trận trực giao. Do đó để thu được hai ma trận này từ ma trận $\mathbf{M}_1$, phương pháp được sử dụng là phép phân rã QR (QR decomposition) như sau: $\mathbf{A} = \mathbf{Q}_{qr} \mathbf{R}_{qr}$ với $\mathbf{Q}_{qr}$ là ma trận trực giao, $\mathbf{R}_{qr}$ là ma trận tam giác trên. Áp dụng phương pháp này lên ma trận $\mathbf{M}_1^{-1}$ được:

$$\mathbf{M}_1^{-1} = \mathbf{Q}_{M_1} \cdot \mathbf{R}_{M_1} \quad (7)$$

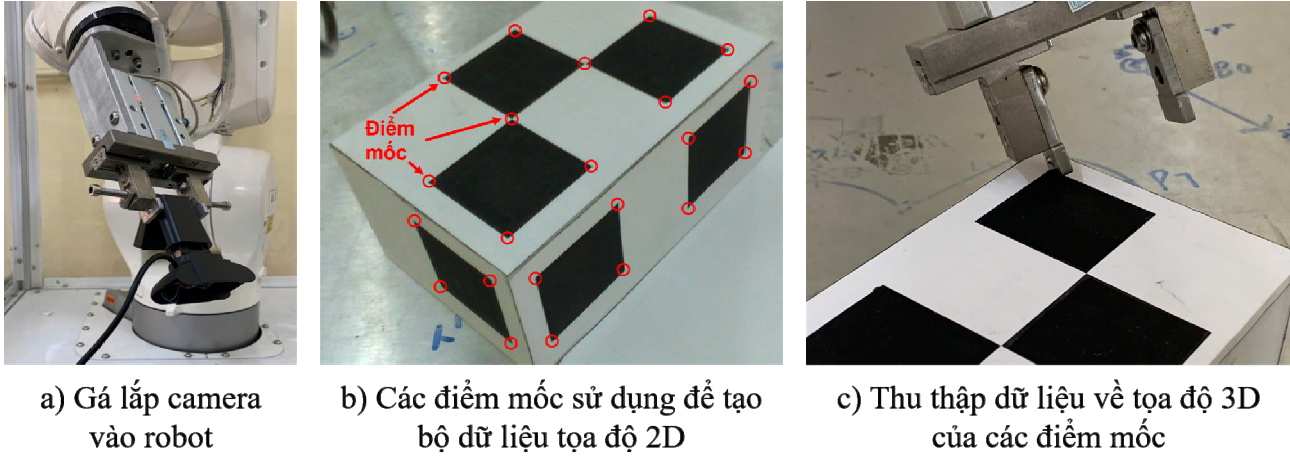
Cũng có: $\mathbf{M}_1^{-1} = (\mathbf{K} \cdot \mathbf{R})^{-1} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1}$. Do đó: $\mathbf{K} = \mathbf{R}_{M_1}^{-1}$; $\mathbf{R} = \mathbf{Q}_{M_1}^{-1}$. Để đảm bảo phần tử ở hàng thứ 3 cột thứ 3 của ma trận $\mathbf{K}$ có giá trị là 1 như trong phương trình (1), cần thực hiện việc hiệu chỉnh ma trận này theo công thức sau:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{k_{33}} \cdot \mathbf{K}$$

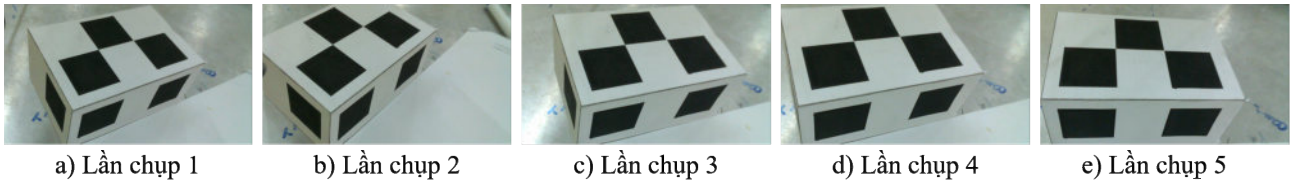
2.2. Quá trình thực hiện

Việc xác định các ma trận $\mathbf{K}$, $\mathbf{R}$ và vector $\mathbf{T}_0$ của camera trong nghiên cứu này gồm hai bước chính: thu thập dữ liệu tọa độ và tính toán các ma trận dựa trên các dữ liệu thu được. Việc thu thập dữ liệu được thực hiện trên bộ thực hành Robot KUKA tại Phòng thí nghiệm Bộ môn Kỹ thuật Cơ điện tử. Khi đó, một camera được gắn trên khâu thao tác của robot như hình 2.a để có thể quan sát và chụp ảnh các điểm được lấy làm mốc (hình 2.b). Vị trí của các điểm mốc này trên ảnh chụp $p_i = [u_i, v_i]^T$ được xác định bởi thuật toán phát hiện góc Harris [5]. Các TOOL, BASE thích hợp

của robot được huấn luyện để có thể xác định được vị trí của các điểm mốc này trong hệ tọa độ toàn cục ${}^wP_i = [{}^wX, {}^wY, {}^wZ]^T$ như trên hình 2.c. Thuật toán phát hiện góc Harris và giải thuật DLT được triển khai trên ngôn ngữ lập trình Python từ đó xác định các ma trận cần tìm bên trên. Dữ liệu của các ma trận quay R và vị trí của gốc tọa độ camera T_0 được so sánh đối chiếu với dữ liệu về vị trí và góc quay hiển thị trên màn hình điều khiển SmartPAD của robot KUKA.



Hình 2. Các bước thu thập dữ liệu cho quá trình tính toán



Hình 3. Các lần chụp để tạo các bộ dữ liệu tính toán

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả tính toán ma trận tham số nội tại

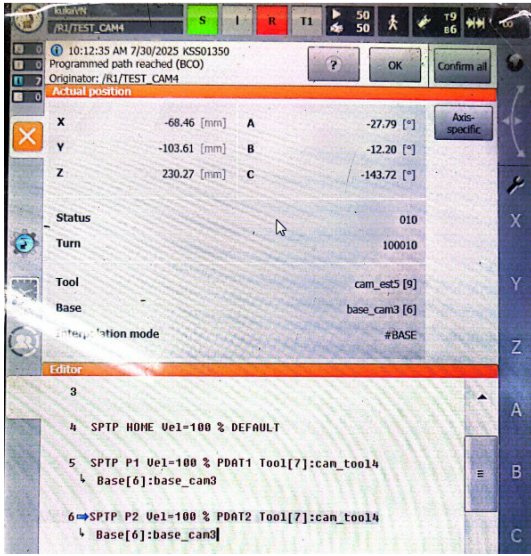
Camera được sử dụng trong nghiên cứu có độ phân giải là 1280×720 , với các góc chụp các điểm mốc như trên hình 3, kết quả thu được ma trận K như sau:

Bảng 1. Giá trị các tham số của ma trận K tại các chụp khác nhau

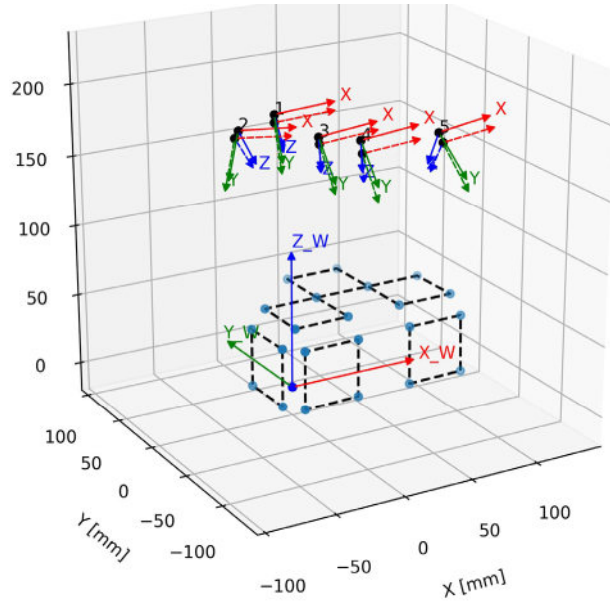
Lần	α_x	α_y	s	u_0	v_0
1	1426.58	1393.81	-6.85	552.34	380.15
2	1428.47	1399.95	-10.69	537.23	350.35
3	1443.89	1403.61	-4.11	545.37	367.52
4	1433.60	1389.23	-17.79	562.39	408.46
5	1459.78	1407.58	-4.34	541.40	403.93
Trung bình	1438.46	1398.84	-8.76	547.75	382.08
Độ lệch chuẩn	13.68	7.38	5.70	9.90	24.47

Các giá trị α_x , α_y , u_0 , v_0 tại các lần đo đều cho các kết quả tính toán ổn định, độ lệch chuẩn nhỏ (dưới 6% khi so sánh với giá trị trung bình). Tuy nhiên, dữ liệu hệ số nghiêng s có dao động mạnh do có độ lệch chuẩn lớn hơn so với các giá trị còn lại. Điều này có thể lý giải là do sai lệch số liệu trong quá trình thu thập dữ liệu tọa độ 2D - 3D của các điểm mốc gây ra bởi ánh sáng trong phòng thí nghiệm, yếu tố con người trong quá trình đo đạc xác định vị trí.

3.2. Kết quả tính toán ma trận tham số ngoại



Hình 3. Dữ liệu về vị trí và góc quay thu thập từ robot



Hình 4. Biểu diễn vị trí và góc quay của camera ở các lần chụp khác nhau

Bảng 3. Số liệu vị trí và góc quay của camera thông qua tính toán và đo đạc

Giá trị	Lần 1		Lần 2		Lần 3		Lần 4		Lần 5	
	DLT	Robot	DLT	Robot	DLT	Robot	DLT	Robot	DLT	Robot
X (mm)	-69.73	-68.46	-86.15	-83.39	-40.20	-38.65	-11.16	-10.10	36.23	36.85
Y (mm)	-105.85	-103.61	-86.34	-85.85	-108.19	-104.64	-109.96	-106.39	-126.44	-121.02
Z (mm)	226.02	230.27	213.53	217.73	208.47	211.88	198.32	205.67	202.33	207.31
A (°)	-29.11	-27.79	-47.15	-46.08	-19.21	-18.13	-19.53	-17.67	-4.34	-3.23
B (°)	-11.71	-12.20	-7.60	-8.38	-11.01	-11.74	-11.40	-11.74	-7.81	-8.81
C (°)	-140.40	-143.72	-137.95	-142.28	-140.58	-144.25	-141.58	-144.26	-139.58	-142.24

Bảng 4. Kết quả đánh giá sai số vị trí và góc quay camera giữa tính toán và đo đạc

Lần đo	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	ΔA (°)	ΔB (°)	ΔC (°)
1	-1.27	-2.24	-4.25	-1.32	0.49	3.32
2	-2.76	-0.49	-4.20	-1.07	0.78	4.33
3	-1.55	-3.55	-3.41	-1.08	0.73	3.67
4	-1.06	-3.57	-7.35	-1.86	0.34	2.68
5	-0.62	-5.42	-4.98	-1.11	1.00	2.66
Trung bình	-1.45	-3.05	-4.84	-1.29	0.67	3.33

Các ma trận tham số ngoại R và vector T_0 được tính toán dựa trên công thức (6) và (7). Để kiểm chứng các kết quả tính toán này, dữ liệu về vị trí và góc quay trên màn hình điều khiển SmartPAD như trên hình 3 được sử dụng. Trong đó, dữ liệu vị trí X, Y và Z nằm ở góc phía bên trái, còn dữ liệu về góc quay A, B và C nằm ở phía bên phải, với A là góc quay quanh trục Z, B là góc quay quanh trục Y và C là góc quay quanh trục X (theo [6]). Số liệu vị trí, góc quay ở mỗi lần chụp được tính toán từ R và T_0 được so sánh với dữ liệu đo từ robot như trong bảng 3. Từ dữ liệu ở bảng này,

hệ tọa độ camera ở mỗi lần chụp có thể được trực quan hóa như trên hình 4, trong đó hệ tọa độ nét đứt biểu thị cho kết quả tính toán dựa trên DLT còn đường nét liền đại diện cho kết quả đo từ robot. Từ đây, có thể nhận thấy được rằng trong các lần chụp, các hệ tọa độ này là sát nhau, kết quả tính toán khớp với kết quả đo, khẳng định tính đúng đắn của phương pháp DLT. Điều này được thể hiện rõ hơn khi phân tích sai số giữa các giá trị này. Với các giá trị tọa độ, sai số trung bình nằm trong khoảng 1 – 5 mm, và là từ 0.5 – 3.5 độ cho sai số trung bình của các giá trị góc quay. Đây là các giá trị sai số nhỏ khi so sánh với giá trị đo và có thể chấp nhận được, tuy nhiên vẫn còn tồn tại các sai số lớn ở trục Z và góc quay C. Sự xuất hiện các sai số này là do sai lệch xuất hiện trong việc gá lắp camera vào khâu thao tác của robot cũng như sai số trong quá trình hiệu chỉnh các TOOL của robot để xác định vị trí và góc quay của camera.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày cách áp dụng phương pháp biến đổi tuyến tính trực tiếp để tính toán ma trận tham số nội tại và ma trận tham số ngoại của camera. Dữ liệu tính toán của các ma trận đã được so sánh và đối chiếu với thông tin thu được từ Robot KUKA. Sau quá trình tính toán hầu hết các tham số có kết quả ổn định và sai lệch nhỏ cho thấy tính hiệu quả của phương pháp này. Bên cạnh đó, một số tham số vẫn còn độ dao động lớn, cho thấy phương pháp này dễ ảnh hưởng bởi nhiễu, sai lệch. Do đó, để nâng cao kết quả tính toán, cần xem xét đến việc giảm thiểu sai lệch trong quá trình lắp đặt, ảnh hưởng của môi trường đến ảnh thu được. Bên cạnh đó, việc áp dụng các giải thuật tiên tiến hơn như trong các nghiên cứu của Zhang, các phương pháp tối ưu phi tuyến để hiệu chỉnh camera hay xem xét hiện tượng biến dạng ảnh do các sai lệch quang học (biến dạng ống kính) cũng cần đề cập đến trong các nghiên cứu tiếp theo.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Förstner, Wolfgang, and Bernhard P. Wrobel. 2016. Photogrammetric computer vision. Vol. 6. Switzerland: Springer International Publishing.
- [2] Zhang, Zhengyou. 2002. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 22(11), 1330-1334.
- [3] Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. 1999. Bundle adjustment—a modern synthesis. In International workshop on vision algorithms (pp. 298-372). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Hartley, Richard, and Andrew Zisserman. 2003. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge university press.
- [5] Harris, Chris, and Mike Stephens. 1988. A combined corner and edge detector. Alvey vision conference. Vol. 15, No. 50, pp. 10-5244.
- [6] KUKA. 2015. KUKA System Software 8.3 Operating and Programming Instructions for System Integrators.

THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÌNH DẠNG PHAO NỔI CHO MÁY PHÁT ĐIỆN NĂNG LƯỢNG SÓNG BIỂN

Trang Thành Trung

Trường Đại học Thủy lợi, email: trangthanhtrung@thu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Năng lượng sóng biển là nguồn năng lượng tái tạo phong phú, ổn định và chưa được khai thác tối đa, có tiềm năng lớn trở thành nguồn điện sạch thay thế nhiên liệu hóa thạch. Cơ chế phao nổi (Buoy system) thu hút sự quan tâm lớn do khả năng tận dụng hiệu quả dao động bề mặt sóng để chuyển đổi thành điện năng. Các dạng phao đa dạng như hình cầu, trụ, nón cụt và hộp chữ nhật đã được phát triển nhằm tối ưu hóa hiệu suất hấp thụ năng lượng sóng, trong đó phao hộp chữ nhật được đánh giá cao về tỷ lệ thể tích chìm và khả năng cộng hưởng [1].

Gần đây, công nghệ mô phỏng thủy động lực học tiên tiến như CFD (Computational Fluid Dynamics) và phương pháp phần tử biên BEM (Boundary Element Method) được ứng dụng rộng rãi để phân tích dòng chảy quanh phao, lực cản và dao động phức tạp. Zhou và cộng sự (2024) [2] đã sử dụng mô hình CFD ba chiều để đánh giá hiệu suất thu năng lượng các loại phao khác nhau trong bể sóng số, trong khi các nghiên cứu khác tập trung tối ưu hóa hình dạng phao, hệ số damping và khoảng cách bố trí thiết bị nhằm nâng cao hiệu quả thu năng lượng [3, 4]. Đồng thời, sự tiến bộ trong việc tích hợp cảm biến thông minh và hệ thống điều khiển tự động giúp điều chỉnh theo điều kiện sóng thực tế, góp phần tối ưu hóa công suất và độ bền của thiết bị [5].

Ở Việt Nam, với đặc trưng sóng ven bờ có biên độ nhỏ và dao động biến thiên, các nghiên cứu đã tập trung vào việc xác định mẫu phao phù hợp dựa trên phân tích thể tích chìm và tỷ lệ chìm, ứng dụng thuật toán tối ưu hình học nhằm cải thiện hiệu suất thu năng lượng trong điều kiện sóng nhẹ điển hình ở miền Trung và vịnh Hạ Long [6]. Nghiên cứu cũng chứng minh tính khả thi của động học motor phát điện một chiều vận hành hiệu quả ở tốc độ quay thấp, tạo tiền đề phát triển các hệ thống máy phát điện sóng quy mô nhỏ và trung bình [7].

Những tiến bộ khoa học và công nghệ này giúp định hướng thiết kế hệ thống phao nổi khai thác năng lượng sóng biển phù hợp điều kiện khí hậu và thủy văn Việt Nam, đồng thời mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi trong phát triển năng lượng tái tạo sạch và bền vững.

2. TÍNH TOÁN TỐI ƯU HÌNH DẠNG PHAO NỔI

Một mô hình phao thu năng lượng bất kỳ luôn có 2 dao động đồng thời là dao động lên xuống theo phương thẳng đứng (dao động nhấp nhô) và dao động lắc qua theo phương ngang (dao động lắc).

Bài báo này tập trung tối ưu hình dạng phao thu năng lượng dao động nhấp nhô theo phương thẳng đứng. Biểu thức tính toán tần số dao động nhấp nhô tự nhiên của phao [1] là

$$f_z = \frac{1}{T_z} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho g A_{wp}}{m + m_w}} \quad (1)$$

Năng lượng của quá trình dao động là

$$E = E_{kz} + E_{pz} = \frac{1}{2}(m + m_w) \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} \rho g A_{wp} z^2 \quad (2)$$

trong đó:

T_z : chu kỳ dao động nhấp nhô tự nhiên (s); ρ khối lượng riêng của nước biển (kg/m³)

A_{wp} phần diện tích tiếp xúc với nước biển; m_w khối lượng phần nước biển tác động vào phao

m khối lượng phần nước biển bị thay thế bởi phần chìm của phao (kg)

E_{kz} , E_{pz} động năng và thế năng dao động toàn phần của phao (KJ)

Dựa vào công thức (1) và (2) có thể thấy để thu được năng lượng dao động lớn nhất thì khối lượng phần nước biển bị thay thế bởi phần chìm của phao m , khối lượng phần nước biển tác động vào phao m_w và phần diện tích tiếp xúc với nước biển A_{wp} càng lớn càng tốt hay nói cách khác thể tích phần chìm của phao (m^3) và phần trăm thể tích chìm của phao lớn nhất thì năng lượng sóng thu được là lớn nhất.

Mặt khác khi vật nổi trên mặt chất lỏng thì lực đẩy Acsimet:

$$F_a = d.V \quad (3)$$

F_a : Lực đẩy Acsimet (N); d : trọng lượng riêng chất lỏng (kg/m^3).

V : là thể tích phần chất lỏng mà phao chiếm chỗ, tức thể tích phần chìm của phao (m^3).

Khi vật nổi cân bằng, lực đẩy Acsimet bằng đúng trọng lượng của phần chất lỏng mà vật chiếm chỗ

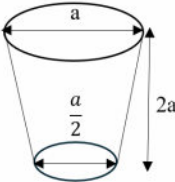
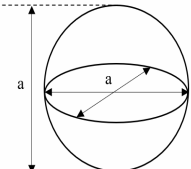
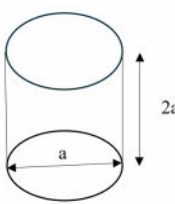
$$P = F_a = d.V_{chìm} \Rightarrow V_{chìm} = \frac{P}{d} = \frac{mg}{d} (m^3) \quad (4)$$

Giả sử phao được làm từ vật liệu EPS có khối lượng riêng $10 kg/m^3$

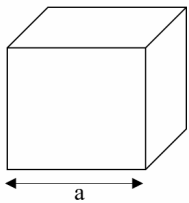
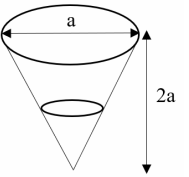
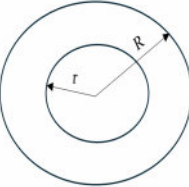
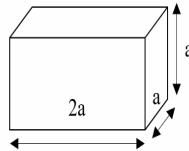
Các phao trong không gian 3 chiều xyz có kích thước giới hạn lần lượt là: a , a , $2a$.

Bảng 1 trình bày kết quả tính toán nhằm xác định hình dạng phao với thể tích phần chìm và tỷ lệ phần trăm thể tích chìm lớn nhất đối với các kiểu hình phao phổ biến

Bảng 1. Tính toán thể tích phần chìm và phần trăm thể tích chìm của các loại hình dạng phao khác nhau

STT	Hình dạng phao	Hình ảnh	Thể tích phao (m^3)	Thể tích phần phao chìm (m^3)	Phần trăm thể tích phần chìm (%)
1	Hình nón cụt		$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + r^2 + Rr)$ $= \frac{1}{3} \pi 2a \left(\frac{a^2}{4} + \frac{a}{2} \frac{a}{4} + \frac{a^2}{16} \right)$ $\approx 0,916a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{P}{d_{nb}} = \frac{DVg}{d_{nb}}$ $= \frac{10.0,916a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0.088a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{V_{chìm}}{V}.100\%$ $= \frac{0,088a^3}{0,916a^3}.100\%$ $\approx 9,607\%$
2	Hình cầu		$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2} \right)^3$ $\approx 0,524a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.0,524a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,05a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,05a^3}{0,524a^3}.100\%$ $\approx 9,542\%$
3	Hình trụ		$V = \pi r^2 h = \pi \left(\frac{a}{2} \right)^2 2a$ $\approx 1,571a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.1,571a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,151a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,151a^3}{1,571a^3}.100\%$ $\approx 9,612\%$

Bảng 1 (tiếp theo)

STT	Hình dạng phao	Hình ảnh	Thể tích phao (m ³)	Thể tích phần phao chìm (m ³)	Phần trăm thể tích phần chìm (%)
4	Hình lập phương		$V = a^3 = a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,0961a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,096a^3}{a^3}.100\%$ $\approx 9,618\%$
5	Hình nón		$V = \frac{1}{3}\pi r^2 h$ $= \frac{1}{3}\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 2a$ $\approx 0,524a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.0,524a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,05a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,05a^3}{0,524a^3}.100\%$ $\approx 9,542\%$
6	Hình vành khăn		$V = \frac{1}{4}\pi^2 (R+r)(R-r)^2$ $= \frac{1}{4}\pi^2 \left(\frac{a}{2} + \frac{a}{4}\right) \left(\frac{a}{2} - \frac{a}{4}\right)^2$ $\approx 0,116a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.0,116a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,011a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,011a^3}{0,116a^3}.100\%$ $\approx 9,483\%$
7	Hình hộp chữ nhật		$V = abc = 2a^3 (m^3)$	$V_{chìm} = \frac{10.2a^3.9,81}{1020}$ $\approx 0,192a^3 (m^3)$	$\%V_{pc} = \frac{0,192a^3}{a^3}.100\%$ $\approx 19,2\%$

Các dạng phao nổi truyền thống như nón cụt, cầu, trụ tròn, lập phương, nón và vành khăn có phần trăm thể tích chìm tương đồng, dao động trong khoảng 9,48% đến 9,62%, cho thấy mức độ chìm tương tự nhau dưới cùng điều kiện. Trong khi đó, phao hình hộp chữ nhật có phần trăm thể tích chìm cao hơn nhiều, đạt tới 19,2%, gấp gần đôi so với các dạng còn lại. Thể tích chìm lớn hơn này phản ánh khả năng phần phao chìm sâu và lực nổi mạnh hơn, tạo tiền đề cho hiệu suất thu năng lượng vượt trội.

Định lượng về hiệu quả thu năng lượng thể hiện rõ, khi phao hộp chữ nhật với tỷ lệ L/d (chiều dài trên chiều cao chìm) tăng, hiệu suất chuyển đổi năng lượng sóng và công suất trung bình thu được tăng đáng kể, có thể đạt tới 25% hiệu suất với công suất xấp xỉ 16.000 W [8]. Sự tăng hiệu suất này bắt nguồn từ khả năng duy trì cộng hưởng hiệu quả và biên độ dao động lớn hơn, dù lực cản thủy động lực học cao hơn do diện tích tiếp xúc mặt nước tăng.

So với các hình dạng khác như hình cầu hay trụ cùng thể tích, phao hộp chữ nhật tạo ra biên độ dao động và mômen thu năng lượng lớn hơn, đồng thời có khả năng chịu tải nặng hơn nhờ lực nổi mạnh mẽ hơn, góp phần tăng tính ổn định vận hành thiết bị trong điều kiện sóng ven bờ đa dạng.

Từ những phân tích về các đặc tính thể tích chìm và các phân tích định lượng hiệu suất thu năng lượng cho thấy phao hộp chữ nhật là lựa chọn tối ưu cho thiết kế máy phát điện năng lượng sóng biển, đặc biệt phù hợp với điều kiện sóng ven bờ có biên độ nhỏ đến vừa, giúp cân bằng hiệu suất cao và độ bền ổn định.

3. TÍNH TOÁN HỆ THỐNG MÁY PHÁT ĐIỆN

Sóng biển ven bờ với biên độ thấp tạo ra chuyển động quay ban đầu rất chậm. Do đó, motor phát điện sử dụng phải hoạt động hiệu quả ở tốc độ thấp và duy trì ổn định khi dòng điện ra đạt mức tối thiểu 12V, nhằm đảm bảo tính tương thích với nguồn điện sử dụng trực tiếp và lưu trữ trong ắc quy.

Motor phát điện một chiều (DC) là lựa chọn ưu việt nhờ khả năng:

- Phát điện ở tốc độ quay thấp,
- Đưa ra dòng điện một chiều ổn định phù hợp lưu trữ và điều khiển,
- Đơn giản hóa hệ thống biến đổi so với motor phát điện AC.

Ở quy mô nhỏ với nguồn năng lượng đầu vào thấp, motor DC vừa đáp ứng kỹ thuật vừa tiết kiệm chi phí vận hành.

3.1. Tính toán motor phát điện DC

Công thức tính suất điện động E của motor phát điện:

$$E = \frac{P \cdot \Phi \cdot Z \cdot N}{60 \cdot A} \quad (5)$$

trong đó:

- P=2 đôi cực từ,
- $\Phi = 0.01 \text{ Wb}$ (sử dụng nam châm vĩnh cửu hiệu suất cao)
- A=2 (dạng cuộn dây mạch sóng),
- N=320 vòng/phút.

Để tạo ra điện áp 12V, tổng số dây dẫn là Z=225.

Do chi phí gia công motor phát điện một chiều đơn chiếc cao, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn sử dụng motor giảm tốc JGB37-3530 với các thông số kỹ thuật gần bằng kết quả tính toán nhằm đảm bảo tính kinh tế và hiệu quả vận hành

- Điện áp định mức 12V,
- Dòng điện 1.5–2A,
- Công suất 24W,
- Mômen định mức 0.49Nm,
- Tỷ số giảm tốc 1:131,
- Hiệu suất 85–90%.

3.2. Tính moment xoắn cần thiết

Dựa trên công suất đầu ra và hiệu suất:

$$P_{out} = U \times I = 12V \times 2A = 24W$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{24}{0.85} \approx 28.24W \quad (6)$$

$$\text{Moment xoắn: } T = \frac{P_{in} \times 60}{2\pi \times N} = \frac{28.24 \times 60}{2\pi \times 320} \approx 0.84Nm \quad (7)$$

Đây là moment tối thiểu để motor hoạt động và tạo điện áp ổn định 12V.

3.3 Thời gian sạc ắc quy

Trong hệ thống chuyển đổi và lưu trữ năng lượng, việc sử dụng bình ắc quy 12V với dung lượng 12Ah được đề xuất để tích trữ điện năng. Năng lượng tích trữ này sau đó sẽ được chuyển đổi thành dòng điện xoay chiều (AC) thông qua một bộ biến tần DC-AC (inverter) để cung cấp cho các thiết bị điện tải. Đối với quá trình nạp lại năng lượng cho bình ắc quy, thời gian sạc ước tính cần được xác định dựa trên cường độ dòng sạc và hiệu suất sạc của hệ thống.

$$E = V \times C = 12 \times 12 = 144(Wh) \quad (8)$$

Thời gian sạc lý thuyết: $t = \frac{144Wh}{24W} = 6(h)$ (9)

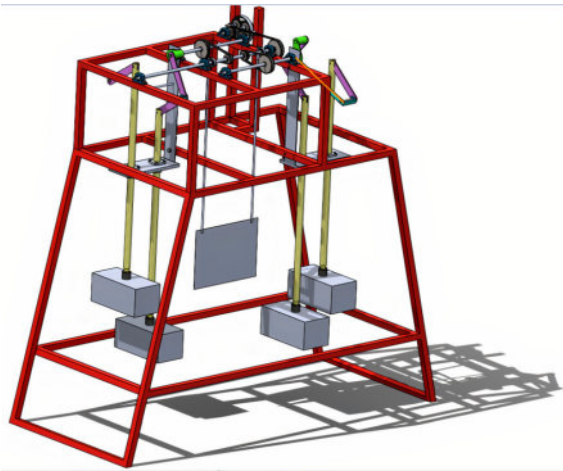
Tính theo hiệu suất sạc 85%: $t = \frac{E}{P \times \eta} = \frac{144}{24 \times 0.85} \approx 7.06(h)$ (10)

Do đó, bình ắc quy sẽ được sạc đầy trong khoảng 7 giờ vận hành.

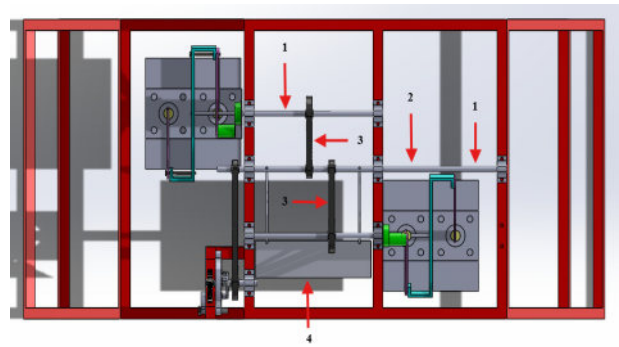
4. THIẾT KẾ TỔNG THỂ HỆ THỐNG

Mô hình máy phát điện sóng biển nghiên cứu phải đảm bảo các yêu cầu: công nghiệp, an toàn, dễ vận hành và hiệu quả trong điều kiện sóng nhỏ.

Thông qua kết quả khảo sát ở vùng ven bờ Thanh Hóa cho thấy biên độ sóng dao động từ 0,1–0,7 m, tập trung chủ yếu trong năm. Do đó, hệ thống được tính toán để vận hành ổn định và tối ưu trong phạm vi sóng biên độ 0,12–0,78 m, phù hợp với điều kiện thực tế.

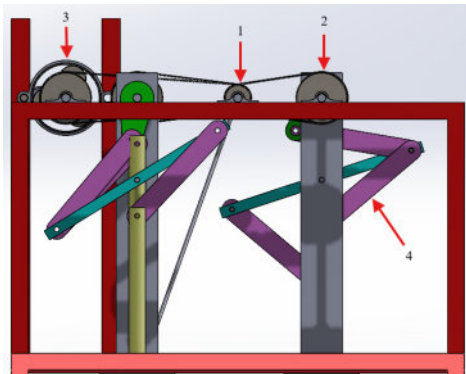


Hình 1. Bản vẽ tổng quan mô hình



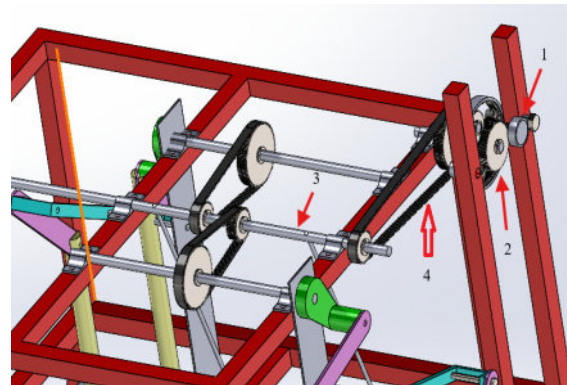
1. Trục dẫn từ phao; 2. Trục chính;
3. Bộ truyền đai; 4. Tấm chắn sóng để thu dao động lắc

Hình 2. Hệ dẫn truyền trực chính



1. Bộ truyền đai sử dụng ổ bi 1 chiều;
3. Hệ bánh răng hành tinh;
4. Hệ chuyển hóa dao động phao thành chuyển động quay của trục

Hình 3. Hệ thu năng lượng phao



1. Mô tơ phát điện; 2. Hệ bánh răng hành tinh;
3. Trục chính; 4. Bộ truyền đai

Hình 4. Hệ truyền động từ trục chính dẫn đến máy phát

Hệ thống thu năng lượng gồm ba phần ngõ vào: một tấm chắn sóng số 4 thu dao động lắc và bốn phao có lắp khớp vận năng để thu dao động nhấp nhô, chuyển động qua bộ truyền đai từ trục phụ sang trục chính. Thiết kế đảm bảo các mômen thành phần trên trục chính cùng chiều, tối ưu hiệu suất chuyển đổi năng lượng và ổn định vận hành hệ thống, khai thác đa dạng dạng năng lượng sóng ven bờ (nhấp nhô, lắc, sóng gợn, sóng vỗ).

Theo dữ liệu thủy hải văn vùng Nam Trung Bộ, sóng nhỏ biên độ 0,2–0,3 m tương ứng chu kỳ 2–3 giây, sóng lớn biên độ 1,2–1,3 m tương ứng chu kỳ 5–7 giây [9]. Chu chuyển động trục chính được tăng tốc qua hệ bánh răng hành tinh và hộp số, đảm bảo máy phát vận hành ổn định ở tốc độ 275–320 vòng/phút, phù hợp đặc trưng dao động sóng.

Cơ cấu truyền động sử dụng liên kết trục chính và trục phụ qua truyền đai, lắp đặt bằng phương pháp xẻ rãnh trục và lồng then bán nguyệt, cung cấp liên kết chắc chắn, truyền mômen hiệu quả, giảm trượt, tăng độ bền cơ học, đồng thời bảo vệ chi tiết khỏi mài mòn và hư hại do lực xoắn và va đập.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tập trung vào thiết kế và tối ưu hình dạng phao nổi cho máy phát điện năng lượng sóng biển, dựa trên phân tích thể tích chìm và tỷ lệ chìm nhằm phù hợp với điều kiện sóng ven bờ Việt Nam. Kết quả cho thấy phao hình hộp chữ nhật với tỷ lệ thể tích chìm lớn nhất (19.2%) có hiệu suất thu năng lượng vượt trội so với các dạng phao truyền thống như hình cầu, trụ, hay nón cụt. Thiết kế hệ thống truyền động và motor phát điện một chiều vận hành hiệu quả ở tốc độ thấp cũng góp phần đảm bảo hoạt động ổn định trong môi trường sóng nhẹ.

Tuy nhiên, nghiên cứu mới dừng ở giai đoạn tính toán và mô phỏng lý thuyết, chưa có thử nghiệm thực tế quy mô lớn để đánh giá đầy đủ tính khả thi, độ bền và hiệu suất trong điều kiện biển thật. Do đó, nghiên cứu sẽ tiếp tục triển khai chế tạo nguyên mẫu, thực hiện thử nghiệm ngoài khơi để kiểm chứng và hoàn thiện thiết kế. Song song đó, sẽ mở rộng phát triển vật liệu composite nhẹ bền vững và hệ thống điều khiển thông minh để tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

Nghiên cứu mở ra triển vọng ứng dụng thiết bị năng lượng sóng biển hiệu quả, góp phần đa dạng hóa nguồn năng lượng tái tạo quốc gia.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Thủy lợi trong đề tài mã số CS2025-6. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã tài trợ kinh phí thực hiện đề tài này.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phùng Văn Ngọc, et al. 2014. Nghiên cứu thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng biển thành năng lượng điện dạng phao nổi. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi.
- [2] Zhou X, Cheng Z, Xia H, Zhao Z and Liu S. 2024. Power absorption and flow-field characteristics analysis for oscillating coaxial twin-buoy wave energy converter by using CFD. Front. Energy Res.
- [3] Wildan Amarullah Arrosyid et al. 2025. Recent advancements in wave energy converter technologies: A comprehensive review on design and performance optimization. Ocean Engineering. Volume 340, Part 2.
- [4] Falnes, J., et al. 2023. Advances in Wave Energy Converters Based on Floating Buoys: Simulation and Experimental Studies. Renewable Energy Journal.
- [5] Phạm, H. T., Lê, M. T., & Vũ, K. N. (2023). Ứng dụng hệ thống điều khiển thông minh trong máy phát điện năng lượng sóng biển. Tạp chí Điều khiển và Tự động hóa, 36(2), 98–110.
- [6] Bùi Văn Tân, et al. 2024. Tối ưu hóa hình dạng phao nổi trong thu năng lượng sóng ven bờ Việt Nam. Tạp chí Năng lượng tái tạo Việt Nam.
- [7] Nguyễn Văn Hùng, et al. 2023. Thiết kế motor phát điện một chiều vận hành tốc độ thấp cho năng lượng sóng biển. Kỷ yếu Hội nghị Khoa học Công nghệ Việt Nam.
- [8] Tổng Đức Năng, Lê Hồng Chương. 2017. Nghiên cứu thiết bị chuyển đổi năng lượng sóng biển đặt ven bờ. Tạp chí Khoa học công nghệ Xây dựng, Tập 11 số 4.
- [9] Hoàng Trung Thành và Nguyễn Trung Thành, "Đánh giá xu thế biến động độ cao và chu kỳ sóng tại khu vực vịnh Bắc Bộ và vùng biển ven bờ Việt Nam," Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 2022.

ĐIỀU KHIỂN CÁNH TAY ROBOT BỐN BẬC TỰ DO BẰNG GIỌNG NÓI VỚI RASPBERRY PI

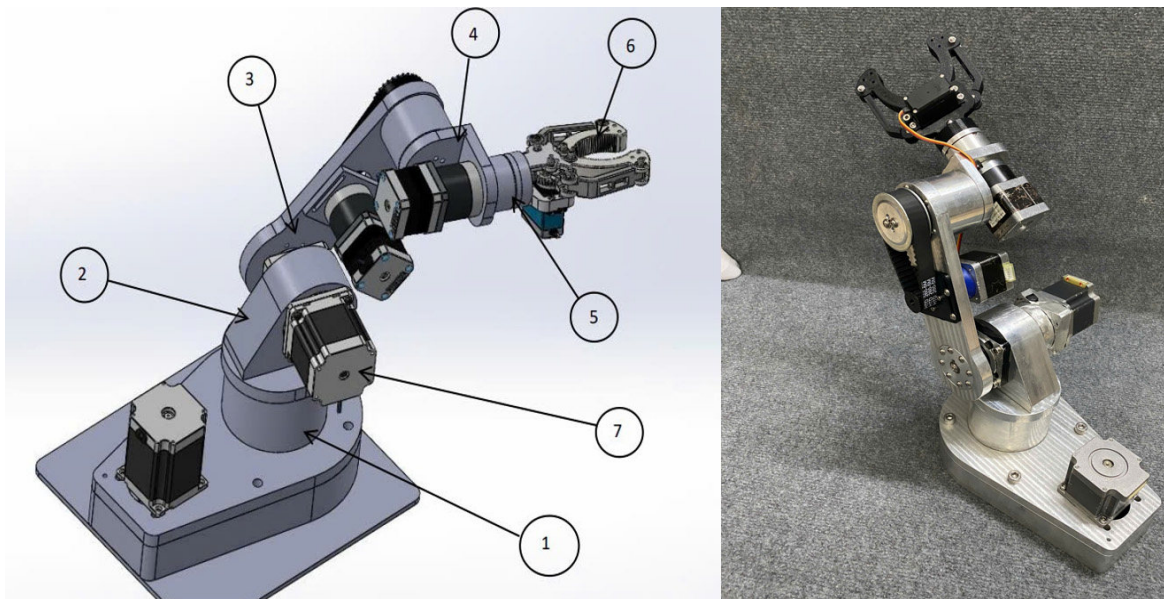
Triệu Thị Minh Thu

Trường Đại học Thủy lợi, email: thutrieu@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Robot được điều khiển bằng giọng nói mang lại tính ứng dụng thực tiễn rất cao. Cánh tay robot hoạt động theo lệnh của người dùng thông qua giọng nói đang được quan tâm nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ nhằm hỗ trợ cho đời sống con người. Trọng lĩnh vực trong y tế, hỗ trợ những người khuyết tật hoặc người có nhu cầu đặc biệt thì phương pháp điều khiển cánh tay robot bằng giọng nói có nhiều ưu điểm hơn hẳn so với các phương pháp khác như nút bấm, ứng dụng di động, IoT về tính tiện lợi rất cao, tốc độ ra lệnh nhanh, dễ triển khai cho người dùng. Việc có thể tương tác giữa người và máy thông qua giọng nói có thể nâng cao mức độ độc lập trong hoạt động của con người.

Hình 1 là mô hình cánh tay robot bốn bậc tự do được thiết kế 3d bằng phần mềm solidworks và hình ảnh thực tế của mô hình được gia công chế tạo bằng vật liệu nhôm, sử dụng các phương pháp gia công hiện đại CNC, nhằm mục đích kiểm nghiệm kết quả nghiên cứu của tác giả. Robot này có khả năng di chuyển và thực hiện các thao tác trong không gian ba chiều với bốn bậc tự do. Điều này có nghĩa là robot có thể di chuyển một cách linh hoạt và chính xác trong không gian để thực hiện nhiệm vụ của mình. Cấu tạo cơ bản của cánh tay robot gồm: 1 là khâu đế, 2 là khâu một, 3 là khâu hai, 4 là khâu ba, 5 là khâu bốn, 6 là cụm tay gấp, 7 là động cơ bước gắn tại khớp hai. Robot được tích hợp cơ cấu kẹp (gripper) để thực hiện các thao tác cầm nắm. Mô hình cánh tay có trọng lượng nhẹ, vận hành bằng năm động cơ, trong đó bốn động cơ bước được sử dụng để tạo chuyển động quay gắn tại bốn khớp xoay và một động cơ servo sử dụng cho cơ cấu chấp hành cuối. Công nghệ nhận dạng giọng nói tự động cho phép hệ thống thu nhận tín hiệu âm thanh thông qua mô đun nhận dạng giọng nói, sau đó xử lý và chuyển đổi thành lệnh điều khiển. Bộ chuyển đổi ADC trong mô đun nhận dạng giọng nói, thực hiện chức năng chuyển đổi tín hiệu giọng nói dạng analog sang dạng digital. Các tín hiệu này được truyền đến máy tính nhúng Raspberry, cho phép tạo ra hệ thống điều khiển liên tục bằng giọng nói đối với cánh tay robot, từ đó hiện thực hóa khả năng vận hành thiết bị một cách chính xác và hiệu quả trong môi trường thực tế.



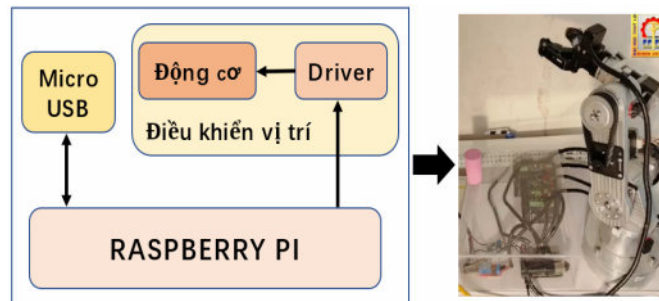
Hình 1. Mô hình cánh tay robot bốn bậc tự do được thiết kế và chế tạo

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

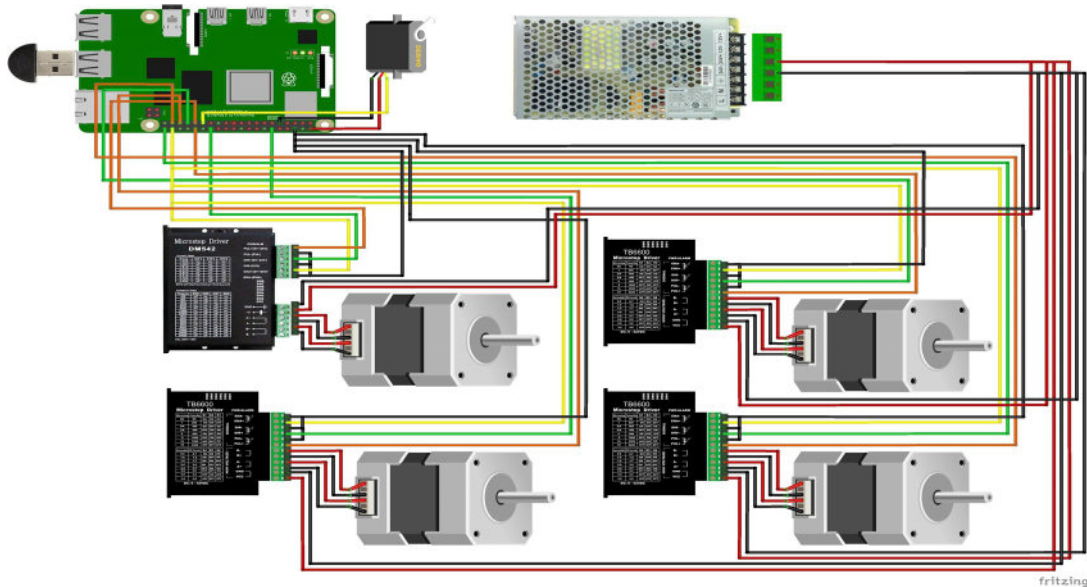
2.1. Hệ thống điều khiển

Bài toán điều khiển hoạt động của robot là: Nhận tín hiệu điều khiển từ người sử dụng thông qua giọng nói. Tính toán các chuyển động cần thiết của các khớp thông qua các thuật toán động học thuận và ngược. Điều khiển các động cơ qua bộ điều khiển để thực hiện các chuyển động của từng khớp. Điều chỉnh các chuyển động của cánh tay robot theo yêu cầu và thực hiện các thao tác (gấp, di chuyển, xoay) với đầu công tác cuối.

Bo mạch điều khiển trung tâm của hệ thống là Raspberry Pi 4. Người sử dụng sẽ đưa ra lệnh điều khiển bằng giọng nói thông qua mô đun micro USB, thiết bị này thu nhận, xử lý tín hiệu âm thanh và truyền về Raspberry Pi. Tại đây, thư viện nhận diện giọng nói được tích hợp sẽ phân tích và chuyển đổi tín hiệu âm thanh thành lệnh điều khiển tương ứng. Khi lệnh hợp lệ được nhận diện, Raspberry Pi sẽ gửi tín hiệu đến các các driver điều khiển động cơ TB6600 để điều khiển bốn động cơ bước Nema 17 hoạt động. Các động cơ bước này được gắn ở bốn khớp của robot để giúp robot hoạt động di chuyển đến vị trí tương ứng với lệnh điều khiển từ giọng nói. Ngoài ra, hệ thống còn sử dụng một động cơ servo MG996 để điều khiển thao tác đóng và mở tay gấp, giúp robot thực hiện chức năng gấp hoặc thả sản phẩm tại vị trí mong muốn.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống



Hình 3. Sơ đồ đấu nối hệ thống điều khiển

2.2. Xử lý giọng nói

Việc kết hợp xử lý giọng nói với cánh tay robot giúp con người điều khiển robot một cách trực quan, tự nhiên và không cần dùng đến thiết bị vật lý như điều khiển tay hay bàn phím. Đây là một hướng đi phát triển mạnh mẽ trong các ứng dụng robot thông minh, dịch vụ, y tế, hỗ trợ người khuyết tật... Các công nghệ xử lý giọng nói phổ biến đều có đặc điểm chung là sử dụng phương pháp nhận dạng giọng nói ghi đến, chuyển thành văn bản, sau đó xử lý theo ứng dụng cụ thể. Đây là

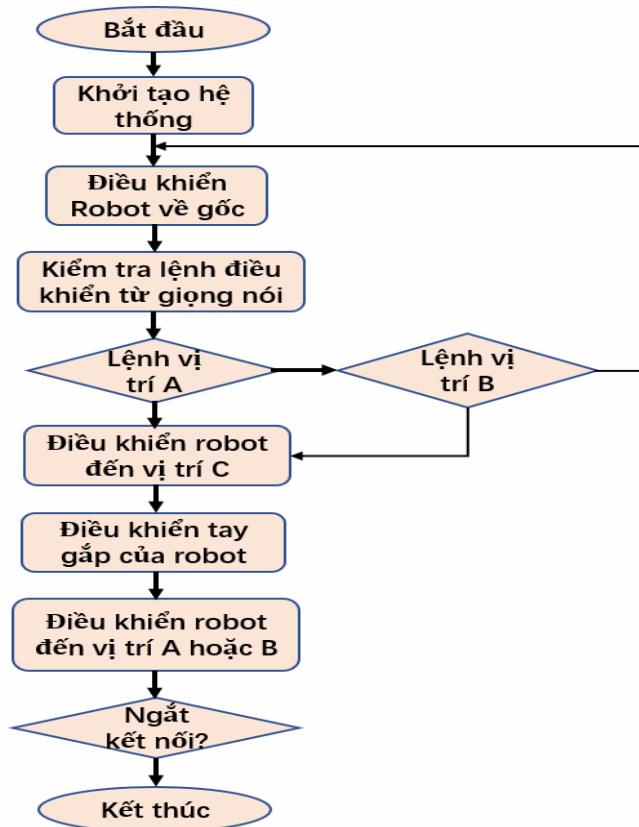
công nghệ mà tác giả áp dụng để điều khiển cánh tay robot. Phương pháp xử lý giọng nói tác giả sử dụng là phần cứng kết hợp nền tảng phần mềm có sẵn, đây là phương pháp đơn giản, phù hợp cho ứng dụng của đề tài. Mô đun micro usb sẽ thu nhận và xử lý giọng nói rồi truyền tín hiệu đến raspberry, kết hợp với các thư viện của Python là SpeechRecognition và sounddevice được chạy trên nền tảng của raspberry để xử lý và đưa ra lệnh điều khiển cho robot hoạt động theo yêu cầu

Quá trình truyền nhận dữ liệu từ mô đun giọng nói đến máy tính nhúng raspberry: Bước 1 là thu tín hiệu âm thanh, khi người sử dụng robot nói sẽ có âm thanh trong môi trường và tác động vào micro usb, tại đây sẽ tạo ra tín hiệu điện áp thay đổi analog. Bước 2 là khuếch đại tín hiệu, tín hiệu analog yếu sẽ khuếch đại lên mức đủ để xử lý. Bước 3 là chuyển đổi tín hiệu analog sang tín hiệu digital, tín hiệu âm thanh được đưa qua bộ chuyển đổi ADC tích hợp, ADC lấy mẫu tín hiệu ở tần số nhất định (thường 8 kHz – 44.1 kHz), chuyển thành tín hiệu digital. Bước 4 là truyền tín hiệu digital qua cổng USB đến máy tính nhúng raspberry pi4, tại đây raspberry sẽ xử lý dữ liệu bằng các thư viện nhận dạng giọng nói Python SpeechRecognition.

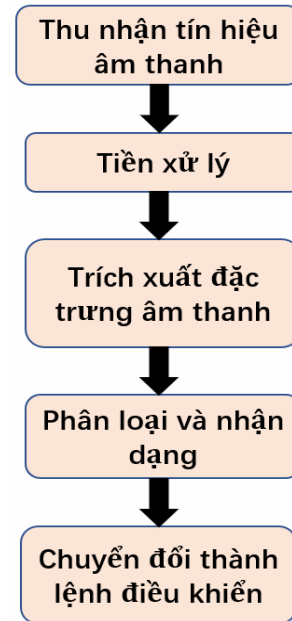
2.3. Điều khiển robot theo giọng nói

Cánh tay robot sẽ được điều khiển theo bài toán như sau: Đầu tiên robot ở vị trí gốc được thiết lập sẵn, người sử dụng sẽ ra lệnh thông qua giọng nói cho robot di chuyển gấp vật đang ở tại vị trí C di chuyển đến vị trí A hoặc B tùy theo yêu cầu. Trong phần lập trình nhận diện giọng nói, tác giả tập trung và việc xây dựng hệ thống nhận lệnh cơ bản, cho phép chuyển đổi các câu lệnh thoại thành tín hiệu điều khiển cho cánh tay robot. Cụ thể, hệ thống xử lý các lệnh đơn giản như “vị trí A”, “vị trí B”, nhằm đảm bảo độ chính xác cao trong quá trình nhận dạng và tránh các từ ngữ phức tạp, dễ gây nhầm lẫn. Sau khi nhận diện được lệnh, chương trình sẽ chuyển đổi chúng thành tín hiệu điều khiển tương ứng với từng động cơ của cánh tay robot, giúp thực hiện chính xác các chuyển động mong muốn. Phần xử lý tín hiệu được thiết kế để đảm bảo tính ổn định, đồng thời dễ dàng mở rộng cho các lệnh phức tạp hơn trong tương lai. Trong phần lập trình điều khiển cánh tay robot, tác giả đã tập trung vào việc điều khiển chuyển động của từng khớp riêng lẻ cũng như phối hợp nhịp nhàng giữa các khớp để thực hiện các thao tác mong muốn. Mỗi động cơ được lập trình để phản hồi theo tín hiệu điều khiển đã được xác định từ hệ thống, đảm bảo thực hiện đúng chuyển động về góc độ hoặc vị trí theo yêu cầu. Bên cạnh đó, tác giả cũng xây dựng cơ chế phối hợp chuyển động giữa các khớp, nhằm tạo ra các thao tác liên tục, mượt mà và chính xác. Quá trình này được kiểm tra và tinh chỉnh để đảm bảo các khớp không bị xung đột trong quá trình vận hành, đồng thời duy trì sự ổn định và an toàn cho toàn bộ hệ thống cánh tay robot.

Để viết chương trình điều khiển robot hoạt động theo lệnh của giọng nói, tác giả có sử dụng một số các thư viện Python như: thư viện RPi.GPIO và RpiMotorLib được sử dụng để điều khiển các chân GPIO trên bo mạch Raspberry Pi, nhằm xuất tín hiệu điều khiển các động cơ, cho phép thiết lập các thông số như tốc độ và hướng quay của động cơ một cách linh hoạt. Thư viện SpeechRecognition và sounddevice dùng để nhận diện giọng nói và xử lý âm thanh, cho phép thu âm từ micro hoặc file âm thanh và chuyển đổi giọng nói thành văn bản, thư viện này hỗ trợ sử dụng các dịch vụ API nhận dạng giọng nói phổ biến như Google Speech Recognition để thực hiện việc chuyển đổi một cách chính xác và nhanh chóng. Thư viện time sử dụng để xử lý các thao tác liên quan đến thời gian. Thư viện NumPy để xử lý mảng và các phép tính toán số học, khoa học. Tác giả lựa chọn hệ điều hành Ubuntu, phiên bản Ubuntu 20.04 cho Raspberry và máy tính. Để cài đặt và truy cập hệ điều hành này cần sử dụng thẻ nhớ, phần mềm balenaEtcher và phần mềm putty. Để viết chương trình điều khiển robot hoạt động theo quỹ đạo yêu cầu tác giả sử dụng ngôn ngữ lập trình Python và viết trên phần mềm Visual studio code. Sau khi cài đặt đầy đủ các phần mềm trên, ta có thể sử dụng Visual studio code để đăng nhập vào ubuntu serve để viết chương trình điều khiển. Hình 4 là lưu đồ thuật toán chương trình điều khiển robot trên nền tảng raspberry pi. Hình 5 là quá trình xử lý giọng nói.



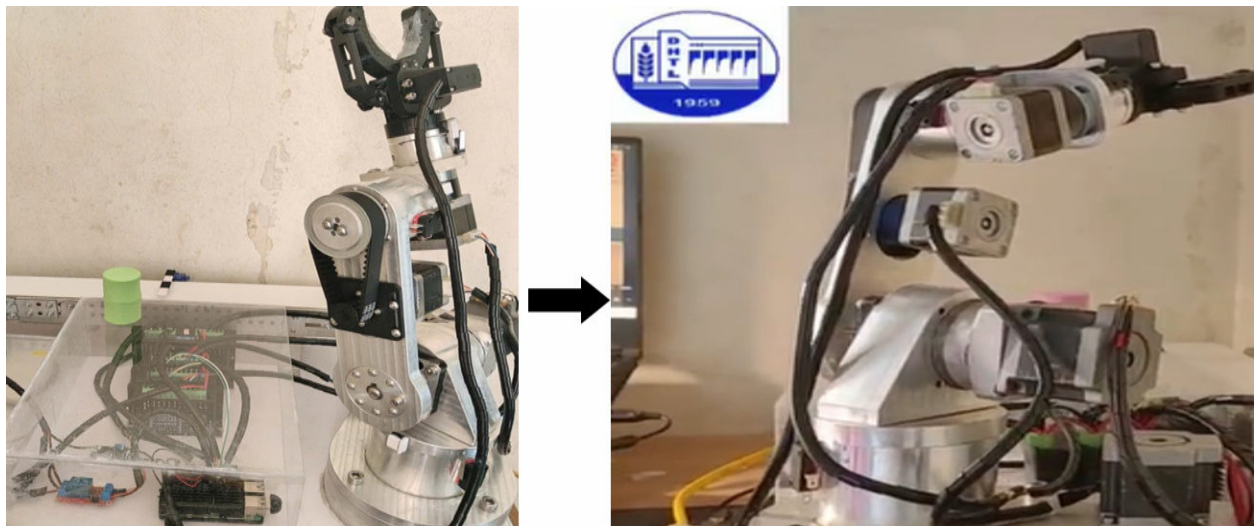
Hình 4. Sơ đồ khối thuật toán điều khiển robot



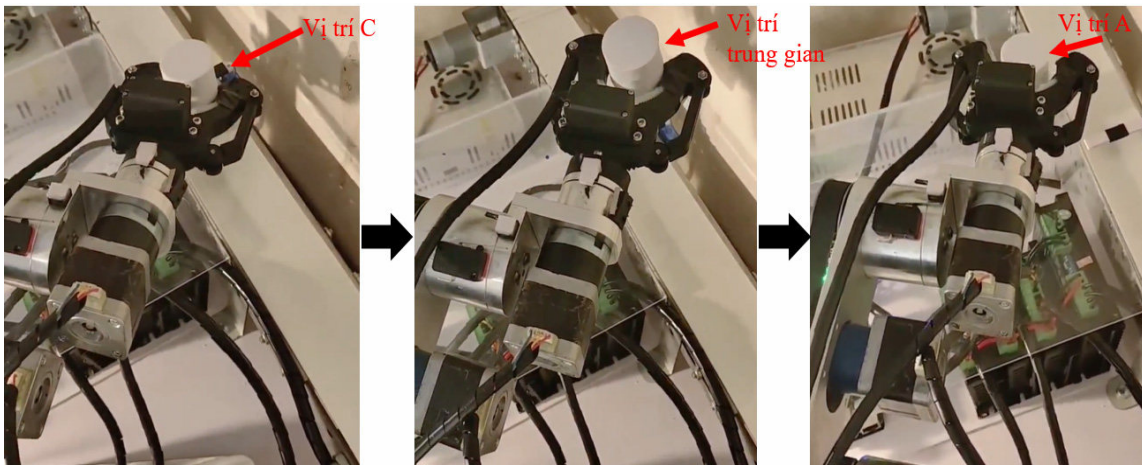
Hình 5. Quá trình xử lý giọng nói

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

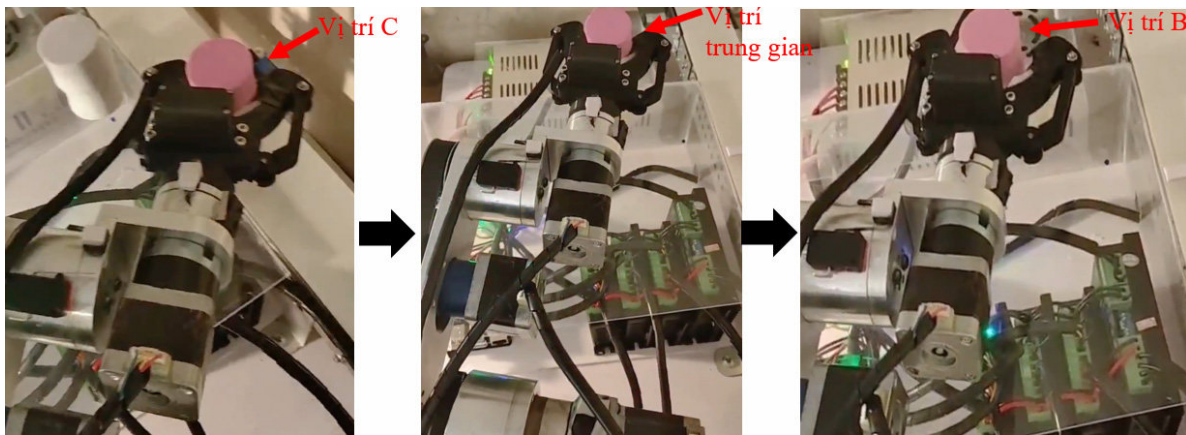
Hình 6 trình bày hoạt động của cánh tay robot đang ở vị trí gốc và được điều khiển đến một vị trí trung gian khi chưa có lệnh điều khiển của giọng nói. Hình 7 và hình 8 trình bày hoạt động của robot khi có lệnh điều khiển thông qua giọng nói của người sử dụng yêu cầu đến vị trí A hoặc vị trí B. Đầu tiên robot sẽ ở vị trí gốc được thiết lập sẵn, khi có lệnh yêu cầu “vị trí A” hoặc “vị trí B” vào micro usb, robot sẽ di chuyển đến vị trí C, gấp vật, sau đó di chuyển đến vị trí A hoặc B, thả vật, cuối cùng trở về vị trí gốc. Lệnh điều khiển bốn động cơ bước ở vị trí C là `move_to([300, 9000, 2000, 500])`, vị trí trung gian là `move_to([800, 8000, 2000, 500])`, vị trí A là `move_to([500, 8000, 2000, 500])`, vị trí B là `move_to([300, 8000, 2000, 500])`, điều khiển động cơ đầu công tác cuối gấp vật là `setServoAngle(0)`, thả vật là `setServoAngle(90)`. Khi ra lệnh điều khiển robot, đối với các từ khóa khác có phát âm rõ rệt là ‘vị trí A’, ‘vị trí B’, kết quả nhận dạng đều đạt độ chính xác trên 90%.



Hình 6. Robot tại vị trí gốc đi đến vị trí bất kỳ



Hình 7. Hoạt động của robot gấp vật từ vị trí C đến A



Hình 8. Hoạt động của robot gấp vật từ vị trí C đến B

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày chi tiết về thiết kế và lập trình hệ thống điều khiển cho mô hình cánh tay robot bốn bậc tự do hoạt động theo lệnh điều khiển của người sử dụng thông qua giọng nói, với mạch điều khiển là Raspberry Pi4. Mô hình robot này có khả năng hoạt động chính xác chuyển động nâng, di chuyển và đặt vật, mở ra nhiều tiềm năng ứng dụng trong tương lai. Bên cạnh đó, tác giả cũng trình bày rõ công nghệ và phương pháp nhận diện giọng nói được áp dụng. Việc áp dụng công nghệ nhận dạng giọng nói giúp người dùng dễ dàng tương tác, điều khiển robot một cách tiện lợi và hiệu quả. Tuy đề tài đang dừng ở mức độ thử nghiệm robot với các lệnh điều khiển đơn giản, môi trường không có độ nhiễu cao, cũng như chưa có thiết bị giúp phản hồi vị trí cho robot khi được điều khiển, nhưng tác giả sẽ tiếp tục phát triển các vấn đề này ở hướng tiếp theo của đề tài. Kết quả của nghiên cứu có thể ứng dụng cho các robot thông minh, dịch vụ, y tế, hỗ trợ người khuyết tật hoặc các tay máy được gắn trên các loại robot di động vận chuyển hàng hóa trong các nhà máy. Nghiên cứu này cũng hy vọng đóng góp cho sự phát triển các sản phẩm robot trợ giúp con người có giá thành rẻ để ứng dụng rộng rãi vào phục vụ xã hội.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đào Duy Anh. 2020. Lập trình Raspberry Pi với Python. Nhà xuất bản Giáo dục.
- [2] A. K. Jain. 2018. Python Programming for Raspberry Pi.
- [3] Alim, S. A., & Rashid, N. K. A. (2018). Some commonly used speech feature extraction algorithms (pp. 2-19). London, UK: IntechOpen.
- [4] Kim, Y., & Ryu, J. (2019). Speech-based human-robot interaction: A review. IEEE Access, 7, 172450-172468.

XÁC ĐỊNH CHIỀU SÂU ẢNH ĐƠN SỬ DỤNG MẠNG NƠ-RON TÍCH CHẬP

Nguyễn Huy Thế, Nguyễn Tuấn Anh

Trường Đại học Thủy lợi, email: nguyenhuythe@tlu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Xác định chiều sâu ảnh là một bài toán nền tảng trong thị giác máy tính, đóng vai trò quan trọng trong nhiều ứng dụng thực tiễn như xe tự lái, robot, thực tế tăng cường/thực tế ảo (AR/VR) và điều hướng tự động [1]. Việc này có thể được thực hiện nhờ các phương pháp truyền thống dựa vào ảnh lập thể hay cảm biến độ sâu. Phương pháp thị giác lập thể (stereo vision) sử dụng cặp ảnh chụp từ hai camera đặt song song để tính toán chiều sâu thông qua độ chênh lệch vị trí của các điểm ảnh tương ứng. Trong khi đó, phương pháp SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) sử dụng chuỗi ảnh liên tiếp từ một camera chuyển động để đồng thời định vị và xây dựng bản đồ chiều sâu của môi trường. Cả hai phương pháp này dựa vào tính toán hình học, bị hạn chế về chi phí phần cứng do yêu cầu hệ thống cảm biến phức tạp, hiệu chỉnh camera chính xác và điều kiện môi trường thuận lợi để đảm bảo độ chính xác của dữ liệu thu thập được. Mặc dù mang lại kết quả tốt trong nhiều trường hợp, các phương pháp này nhạy cảm với thay đổi ánh sáng hoặc chuyển động nhanh. Do đó, việc xác định chiều sâu chỉ từ một ảnh đơn ngày càng thu hút sự quan tâm nghiên cứu và ứng dụng trong công nghiệp.

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của các mô hình học sâu (deep learning), đặc biệt là mạng nơ-ron tích chập (Convolutional Neural Network - CNN) đã mở ra cơ hội mới để tiếp cận bài toán này bằng phương pháp học từ dữ liệu [8, 9]. Ngược với các phương pháp truyền thống, xác định chiều sâu từ ảnh đơn bằng học sâu không yêu cầu hệ thống đa camera hay chuyển động. Thay vào đó, mô hình học sâu được huấn luyện để suy luận chiều sâu từ các đặc trưng trừu tượng trong ảnh RGB đơn, như kích thước tương đối, phối cảnh, mờ nhoè do độ sâu, và cấu trúc cảnh vật. Các mô hình này học có giám sát trực tiếp từ dữ liệu đã gán nhãn độ sâu hoặc học tự giám sát gián tiếp qua ràng buộc hình học. Các mô hình tiên tiến như Monodepth2, MiDaS và DPT đã đạt được kết quả ấn tượng trong cả môi trường trong nhà lẫn ngoài trời. Monodepth2 sử dụng phương pháp học không giám sát từ ảnh lập thể hoặc video, trong khi MiDaS và DPT được huấn luyện với tập dữ liệu kết hợp từ nhiều nguồn khác nhau, cho phép mô hình suy luận chiều sâu tương đối một cách ổn định và linh hoạt. Đặc biệt, các mô hình này không chỉ đạt hiệu năng cao trên tập kiểm thử mà còn cho thấy khả năng tổng quát hóa tốt sang các hình ảnh từ miền dữ liệu chưa từng thấy trong quá trình huấn luyện.

Một yếu tố then chốt góp phần vào sự thành công của các phương pháp học sâu là sự sẵn có của các tập dữ liệu lớn và chất lượng cao, tiêu biểu là KITTI, NYU Depth v2 và Make3D. Bộ dữ liệu KITTI [2] là một bộ dữ liệu ngoài trời để xác định chiều sâu ảnh đơn, phát hiện và theo dõi đối tượng dựa trên học sâu, được phát triển chung bởi Viện Công nghệ Karlsruhe (Đức) và Viện Công nghệ Toyota (Hoa Kỳ). Bộ dữ liệu này được thu thập từ một ô tô được trang bị 2 camera màu độ phân giải cao, 2 camera xám, máy quét laser và hệ thống định vị toàn cầu GPS, với khoảng cách đo tối đa là 120m. Bộ dữ liệu chứa tổng cộng 93.000 mẫu huấn luyện RGB-D, bao gồm năm danh mục: "Đường", "Thành phố", "Khu dân cư", "Khuôn viên trường" và "Người", từ thành phố Karlsruhe, khu vực hoang dã và đường cao tốc. Kích thước ảnh gốc của KITTI là 1.242×375 , và bản đồ độ sâu tham chiếu khá thưa.

Bộ dữ liệu NYU Depth V2 [3] là một bộ dữ liệu trong nhà dùng để xác định chiều sâu ảnh đơn dựa trên học sâu, được cung cấp bởi Silberman và cộng sự tại Đại học New York. Bộ dữ liệu NYU Depth V2 chứa 407.024 khung hình ảnh cặp RGB-D được chụp bởi camera RGB và camera độ sâu

Microsoft Kinect để thu thập đồng thời thông tin RGB và độ sâu của 464 cảnh trong nhà khác nhau. Kích thước ảnh gốc của NYU Depth V2 là 640×480 và độ sâu của tập dữ liệu dao động từ 0,5m đến 10m. Do độ lệch vị trí giữa RGB và camera độ sâu, bản đồ độ sâu gốc bị thiếu các phần hoặc nhiễu. Các tác giả đã chọn 1.449 ảnh từ tập dữ liệu và sử dụng thuật toán tô màu để thu được các bản đồ độ sâu kín, sau đó được gắn nhãn thủ công bằng thông tin ngữ nghĩa. Các mẫu đó được chia thành 795 mẫu huấn luyện và 654 mẫu thử nghiệm.

Bộ dữ liệu Make3D [4] là một bộ dữ liệu ngoài trời khác dùng để xác định chiều sâu ảnh đơn dựa trên học sâu, được xây dựng bởi Saxena và cộng sự tại Đại học Stanford. Bộ dữ liệu Make3D bao gồm thành phố và cảnh quan thiên nhiên ban ngày, với bản đồ độ sâu được thu thập bằng máy quét laser. Độ sâu dao động từ 5 m đến 81 m, và phạm vi lớn hơn được ánh xạ đồng đều đến 81 m. Bộ dữ liệu này chứa tổng cộng 534 cặp ảnh RGB-D, 400 cặp được sử dụng để huấn luyện và 134 cặp được sử dụng để kiểm tra. Độ phân giải gốc của ảnh RGB là 2.272×1.704 , và độ phân giải của bản đồ độ sâu tham chiếu là 55×305 pixel.

Những tập dữ liệu nêu trên không chỉ cung cấp hình ảnh và bản đồ độ sâu tương ứng, mà còn cho phép đánh giá định lượng một cách chuẩn hóa các mô hình khác nhau. Ngoài ra, việc kết hợp kiến thức truyền thống từ xử lý ảnh, như phân đoạn cảnh, phát hiện biên, hay phân tích cấu trúc hình học, với mạng học sâu giúp tăng cường độ chính xác và độ ổn định cho các mô hình học sâu. Tuy nhiên, các mô hình học sâu vẫn đối mặt với thách thức về tổng quát hóa với dữ liệu ngoài miền, sai số tuyệt đối trong dự đoán chiều sâu thực nếu chỉ học chiều sâu tương đối và yêu cầu tài nguyên tính toán trong huấn luyện.

Bài báo này tập trung giới thiệu một số mô hình học sâu để xác định chiều sâu ảnh đơn, phương pháp xác định chiều sâu ảnh đơn sử dụng mô hình học sâu và kết quả mô phỏng định tính minh họa chiều sâu ảnh xác định được.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các mô hình học sâu phổ biến để xác định chiều sâu ảnh đơn bao gồm mạng nơ-ron tích chập (CNN), mạng nơ-ron hồi quy (RNN) và mạng đối kháng tạo sinh (GAN). Trong đó, CNN có thể tự động trích xuất các đặc điểm không gian biểu diễn độ sâu trong một cảnh. Đây là một loại mạng nơ-ron truyền thẳng, cho phép trích xuất các đặc điểm độ sâu và tái tạo bản đồ độ sâu cùng lúc với ít tham số hơn so với các phương pháp truyền thống. CNN chủ yếu bao gồm lớp tích chập, lớp gộp, lớp kết nối đầy đủ và hàm kích hoạt, cho phép CNN học các đặc điểm không gian hai chiều của ảnh đầu vào. Lớp tích chập biến đổi đầu vào thành các đặc điểm độ sâu; lớp gộp giảm kích thước của bản đồ đặc điểm đầu vào theo phương pháp gộp tối đa hoặc gộp trung bình; lớp kết nối đầy đủ thường nằm ở cuối CNN để xuất kết quả; và hàm kích hoạt thường là một hàm phi tuyến tính liên tục có thể phân biệt được để tránh các tổ hợp tuyến tính thuần túy.

RNN là một mô hình chuỗi-sang-chuỗi có khả năng ghi nhớ, bao gồm ba phần: đơn vị đầu vào, đơn vị ẩn và đơn vị đầu ra, trong đó đầu vào của đơn vị ẩn bao gồm đầu ra của cả đơn vị đầu vào hiện tại và đơn vị ẩn trước đó. GAN bao gồm hai bộ phận là bộ tạo mạng ước tính chiều sâu và bộ phân biệt xác định tính đúng/sai của mạng chiều sâu đầu vào.

Theo góc nhìn của phương pháp huấn luyện mô hình, có ba loại phương pháp học sâu chính bao gồm học có giám sát, không giám sát và bán giám sát để xác định độ sâu ảnh đơn. Mạng có giám sát xác định chiều sâu ảnh đơn ước lượng bản đồ chiều sâu bằng cách học thông tin cấu trúc cảnh từ bản đồ độ sâu tham chiếu. Bản đồ này là ảnh 2D thu thập từ cảm biến chính xác, trong đó mỗi điểm ảnh lưu trữ thông tin về khoảng cách từ điểm đó đến camera. Việc tạo bản đồ độ sâu tham chiếu rất tốn kém, do đó một số mạng xác định chiều sâu ảnh đơn cần được huấn luyện với ít hoặc không có độ sâu tham chiếu để tái tạo bản đồ độ sâu, đó là các phương pháp học bán giám sát hoặc không giám sát.

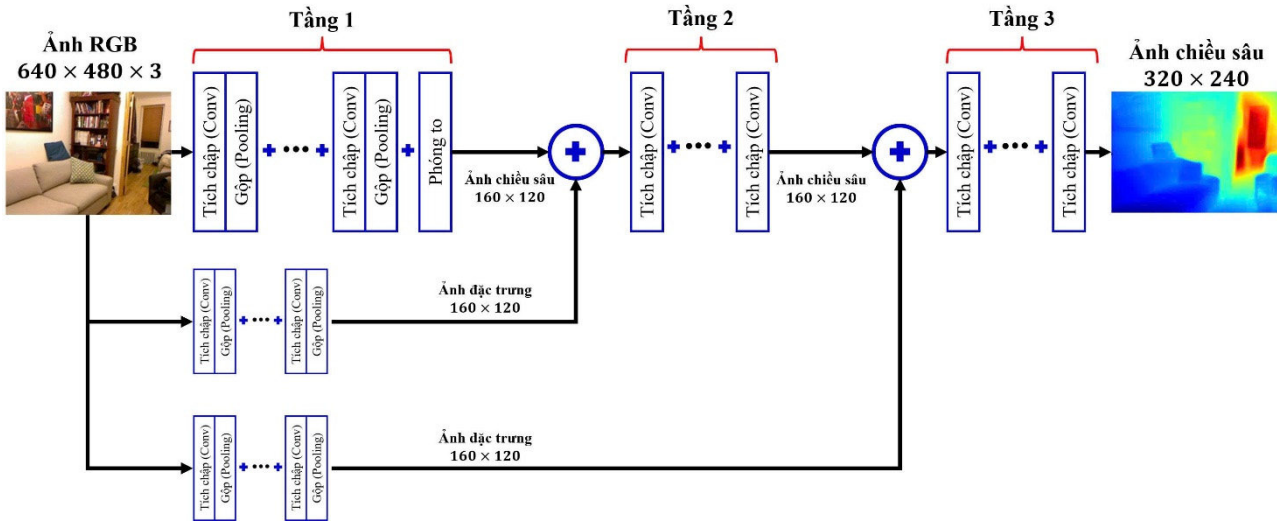
Mạng không giám sát xác định độ sâu ảnh đơn thường được huấn luyện với các cặp ảnh lập thể hoặc chuỗi ảnh đơn, và được thử nghiệm trên các ảnh hoặc chuỗi ảnh đơn, được huấn luyện với các ràng buộc hình học của cảnh.

Để sử dụng hiệu quả một lượng lớn dữ liệu không có nhãn tương đối rẻ nhằm cải thiện hiệu suất học, phương pháp học bán giám sát được đưa vào các thông tin khác, chẳng hạn như dữ liệu tổng hợp, pháp tuyến bề mặt và LIDAR, làm các yếu tố học bán giám sát để giảm sự phụ thuộc của mô hình vào bản đồ độ sâu tham chiếu, giúp tăng cường tính nhất quán về tỷ lệ và cải thiện độ chính xác của bản đồ độ sâu dự đoán.

Xét về nhiệm vụ thực hiện, các phương pháp học sâu để xác định độ sâu ảnh đơn có thể được chia thành hai loại là học đơn nhiệm và đa nhiệm. Cốt lõi của phương pháp học đơn nhiệm là xây dựng một mô hình liên hệ ảnh RGB đầu vào với bản đồ độ sâu. Tùy thuộc vào giá trị độ sâu do mạng trả về có liên tục hay không, phương pháp học đơn nhiệm có thể được chia thành phương pháp hồi quy [5] và phương pháp phân loại [6]. Hầu hết các phương pháp xác định chiều sâu ảnh đơn hiện có đều là phương pháp hồi quy, có thể trực tiếp thu được bản đồ độ sâu chứa các giá trị độ sâu liên tục ở cấp độ điểm ảnh. Các phương pháp phân loại trước tiên rời rạc các giá trị độ sâu và sau đó hồi quy từng phần các giá trị đó.

Để tận dụng tính hỗ trợ của chiều sâu và các đặc trưng khác, việc huấn luyện đa nhiệm đã được đề xuất, các đặc trưng được trích xuất từ các nhiệm vụ khác nhau được tham chiếu lẫn nhau để cải thiện bản đồ độ sâu. Trong [7], ba nhiệm vụ xác định độ sâu, pháp tuyến bề mặt và chú thích ngữ nghĩa đã được thống nhất.

Bài báo này chỉ tập trung vào phương pháp học sâu đơn nhiệm, huấn luyện mô hình có giám sát để xác định chiều sâu ảnh đơn. Mô hình học sâu được sử dụng là một mạng đa tầng biểu diễn trong Hình 1, trong đó dự đoán trước một đầu ra toàn cục dựa trên toàn bộ vùng ảnh, sau đó tinh chỉnh bằng các mạng cục bộ ở cấp mịn hơn [7].



Hình 1. Cấu trúc của mô hình học sâu

Tầng thứ nhất trong mạng xử lý toàn bộ ảnh, dự đoán một tập đặc trưng thô thay đổi theo không gian trên toàn bộ ảnh, được thực hiện thông qua việc sử dụng các lớp tích chập và lớp gộp. Cụ thể, ảnh đầu vào là ảnh RGB có kích thước $640 \times 480 \times 3$. Đầu ra của lớp cuối cùng được chuyển đổi thành kích thước không gian ở tỷ lệ $1/16$, nghĩa là 40×30 với 64 kênh đặc trưng, sau đó được tăng độ phân giải lên tỷ lệ $1/4$ thành 160×120 . Quá trình tăng phân giải đặc trưng là tuyến tính, nếu sử dụng độ phân giải lớn, chỉ có thể tạo ra đầu ra mờ, do đặc trưng đầu vào bị giới hạn, nên cần giới hạn độ phân giải và phóng to. Đầu ra ở tỷ lệ $1/16$ vẫn đủ lớn để nắm bắt sự biến đổi không gian đáng kể.

Các lớp trên cùng là lớp liên kết đầy đủ, mỗi vị trí không gian trong đầu ra sẽ được kết nối với toàn bộ đặc trưng của ảnh, qua đó tích hợp một trường nhìn rất rộng, không bị bó hẹp trong lân cận điểm ảnh tương ứng. Việc kết nối toàn ảnh này đặc biệt quan trọng đối với nhiệm vụ xác định chiều sâu ảnh đơn.

Tầng thứ hai có nhiệm vụ tạo ra dự đoán ở độ phân giải trung bình, bằng cách kết hợp giữa thông tin toàn ảnh từ tầng thứ nhất và cái nhìn chi tiết hơn nhưng trong phạm vi nhỏ hơn của ảnh đầu vào. Điều này được thực hiện bằng cách kết nối các bản đồ đặc trưng của mạng thô với dữ liệu đặc trưng

từ ảnh RGB gốc sau khi qua các lớp tích chập và lớp gộp, với bước dịch chuyển của bộ lọc nhỏ hơn. Đầu ra vẫn là ảnh có kích thước không gian 160×120 , giá trị tại các pixel là chiều sâu dự đoán nhưng chi tiết hơn so với tầng thứ nhất.

Hai tầng vừa nêu được huấn luyện đồng thời bằng thuật toán tối ưu hóa gradient ngẫu nhiên SGD, sử dụng các hàm mất mát được mô tả trong công thức (1).

Tầng thứ ba trong mô hình dùng để tinh chỉnh các dự đoán lên độ phân giải cao hơn, bằng cách nối đầu ra của tầng thứ hai với các bản đồ đặc trưng được tạo ra từ ảnh gốc và sử dụng bước dịch chuyển của bộ lọc nhỏ hơn nữa để tích hợp cái nhìn chi tiết hơn của ảnh. Việc tinh chỉnh này giúp đầu ra khớp chính xác hơn với các chi tiết có độ phân giải cao, tạo ra kết quả có tính liên tục về mặt không gian và chi tiết hơn. Độ phân giải đầu ra cuối cùng của mô hình là bằng một nửa độ phân giải của ảnh đầu vào, nghĩa là 320×240 .

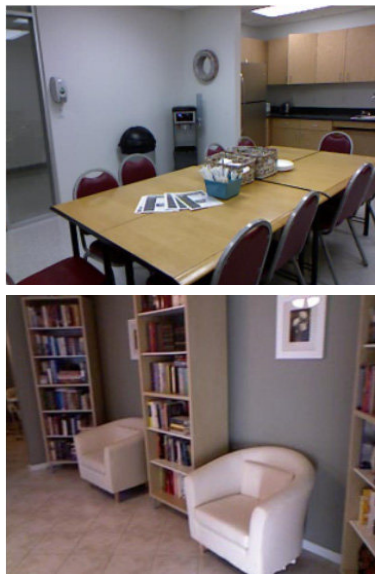
Đối với bài toán dự đoán độ sâu ảnh, hàm mất mát được sử dụng để so sánh giữa bản đồ độ sâu theo logarit dự đoán D và tham chiếu D^* . Gọi $d = D - D^*$ là sai khác giữa hai bản đồ, hàm mất mát được định nghĩa là

$$L = \frac{1}{n} \sum_i d_i^2 - \frac{1}{2n^2} \left(\sum_i d_i \right)^2 + \frac{1}{n} \sum_i \left[(\nabla_x d_i)^2 + (\nabla_y d_i)^2 \right] \quad (1)$$

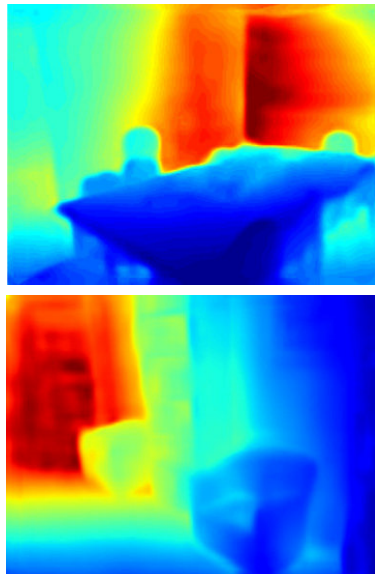
trong đó, các tổng được thực hiện trên các điểm ảnh hợp lệ i và n là tổng số điểm ảnh hợp lệ, đó là các điểm ảnh có giá trị tham chiếu; $\nabla_x d_i$ và $\nabla_y d_i$ là gradient theo chiều ngang và dọc của sai khác độ sâu trên ảnh. Ở đây, thành phần $(\nabla_x d_i)^2 + (\nabla_y d_i)^2$ có tác dụng so sánh gradient của ảnh dự đoán và ảnh tham chiếu, giúp mô hình tạo ra giá trị độ sâu gần đúng, đồng thời phỏng theo cấu trúc cục bộ trong bản đồ độ sâu thực. Mô hình độ sâu hội tụ khi giá trị độ sâu dự đoán càng gần giá trị tham chiếu càng tốt.

Mô hình được huấn luyện theo hai giai đoạn sử dụng SGD. Đầu tiên, hai tầng 1 và 2 được huấn luyện đồng thời. Sau đó, các tham số của hai tầng đó được giữ cố định và huấn luyện tầng thứ ba. Vì tầng thứ ba chứa số lượng điểm ảnh gấp bốn lần tầng thứ hai, nên việc huấn luyện sử dụng toàn bộ vùng ảnh cho mỗi bước gradient sẽ tốn kém. Để tăng tốc độ huấn luyện, có thể sử dụng các vùng ngẫu nhiên kích thước 74×55 . Toàn bộ ảnh được truyền thẳng qua các tầng 1 và 2, phóng to và cắt một vùng của kết quả làm đầu vào tầng thứ ba, cũng như đầu vào RGB gốc tại vị trí tương ứng. Ảnh đã cắt và kết quả dự đoán ở tầng thứ hai được truyền qua tầng thứ ba, với các trọng số được cập nhật.

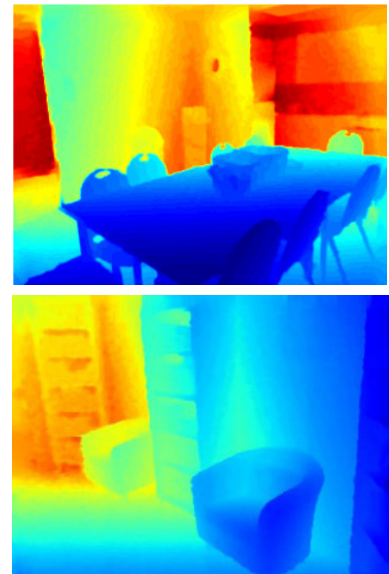
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU



a) Ảnh đầu vào RGB



b) Độ sâu dự đoán



c) Độ sâu tham chiếu

Hình 2. Kết quả xác định chiều sâu ảnh đơn

Phương pháp học sâu được áp dụng để dự đoán độ sâu trên NYUDepth v2. Mô hình được huấn luyện bằng toàn bộ dữ liệu thô của NYUDepth v2, sử dụng phân tách cảnh được xác định trong dữ liệu huấn luyện/kiểm tra và được kiểm tra trên các bản đồ độ sâu phân phối chung. Vì đầu ra mạng có độ phân giải thấp hơn ảnh NYUDepth gốc và không bao gồm đường biên nhỏ, đầu ra mạng được phóng lên tỷ lệ ảnh gốc 640×480 và ngoại suy đường biên bị thiếu bằng bộ lọc hai yếu tố vị trí-màu sắc điều hướng theo ảnh mẫu. Kết quả định tính xác định chiều sâu ảnh đơn được biểu diễn trong Hình 2 khá sắc nét, cho thấy sự phù hợp của độ sâu dự đoán và độ sâu tham chiếu.

4. KẾT LUẬN

Xác định chiều sâu từ ảnh đơn không chỉ là một bài toán hấp dẫn về mặt học thuật mà còn có tiềm năng ứng dụng rất cao trong thực tế. Việc triển khai dự đoán độ sâu từ ảnh đơn có thể thực hiện được bằng cách sử dụng cấu trúc mạng học sâu hiệu quả và bộ dữ liệu phù hợp với kỹ thuật được áp dụng trong học máy. Bài báo đã giới thiệu một số bộ dữ liệu chất lượng cao tiêu biểu để huấn luyện mô hình học sâu ước lượng độ sâu ảnh đơn. Bài báo này trình bày mô hình học sâu sử dụng mạng nơ-ron tích chập, tóm tắt thuật toán xác định độ sâu ảnh đơn, với phương pháp học sâu đơn nhiệm và huấn luyện mô hình có giám sát. Kết quả mô phỏng định tính cho thấy giá trị độ sâu dự đoán gần với giá trị tham chiếu. Kết quả định lượng cần được tiếp tục nghiên cứu và thực hiện các phương pháp huấn luyện đa nhiệm trên các bộ dữ liệu khác nhau.

5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Alam, M.D. Samad, L. Vidyaratne, A. Glandon, K.M. Iftekharruddin. 2020. Survey on Deep Neural Networks in Speech and Vision Systems. *Neurocomputing*, pp 302-321.
- [2] A. Geiger, P. Lenz, R. Urtasun. 2012. Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite. In: 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE. pp. 3354-3361.
- [3] N. Silberman, D. Hoiem, P. Kohli, R. Fergus. 2012. Indoor Segmentation and Support Inference from RGBD Images, in: European conference on computer vision. Springer. pp. 746-760.
- [4] A. Saxena, S.H. Chung, A.Y. Ng. 2006. Learning Depth from Single Monocular Images. In: *Advances in neural information processing systems*, pp. 1161-1168.
- [5] I. Laina, , C. Rupprecht, V. Belagiannis, F. Tombari, N. Navab. 2016. Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks. In: 2016 Fourth international conference on 3D vision, IEEE. pp. 239-248.
- [6] Y. Cao, Z. Wu, C. Shen. 2017. Estimating Depth from Monocular Images as Classification using Deep Fully Convolutional Residual Networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 28, 3174-3182.
- [7] D. Eigen, R. Fergus. 2015. Predicting Depth, Surface Normals and Semantic Labels with a Common Multi-scale Convolutional Architecture. In: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pp. 2650-2658.
- [8] U. Rajapaksha, F. Sohel, H. Laga, D. Diepeveen, M. Bennamoun. 2024. Deep Learning-based Depth Estimation Methods from Monocular Image and Videos: A Comprehensive Survey. *ACM Computing Surveys*. arXiv:2406.19675.
- [9] J. Zhang. 2025. Survey on Monocular Metric Depth Estimation. arXiv:2501.11841.

THIẾT KẾ MÁY PHÁT ĐIỆN NĂNG LƯỢNG SÓNG BIỂN DỰA TRÊN NGUYÊN LÝ HỆ HẤP THU TUYẾN TÍNH

Trang Thành Trung

Trường Đại học Thủy lợi, email: trangthanhtrung@thu.edu.vn

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Năng lượng sóng biển là nguồn năng lượng tái tạo tiềm năng, cung cấp nguồn năng lượng xanh, bền vững và thân thiện với môi trường. Trong các công nghệ thu năng lượng sóng, hệ thống máy phát điện dựa trên nguyên lý hấp thu tuyến tính được quan tâm nhờ cấu trúc đơn giản và hiệu quả trong chuyển đổi dao động tịnh tiến của phao nổi thành năng lượng cơ học, rồi thành điện năng qua máy phát tuyến tính, giảm tổn thất cơ học và chi phí bảo trì so với hệ truyền động quay truyền thống [1].

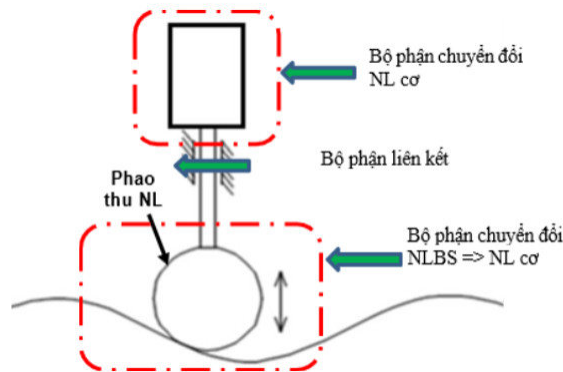
Việc thiết kế và lựa chọn hình dạng phao (cầu, trụ, nón cụt, hộp chữ nhật) quyết định hiệu suất thu năng lượng phù hợp với dao động sóng nhấp nhô hoặc lắc [2]. Mô phỏng thủy động lực học hiệu năng cao (HPC) được áp dụng để tối ưu cấu trúc, vật liệu và hình học phao, nâng cao hiệu quả và độ bền trong môi trường biển khắc nghiệt [3]. Nghiên cứu của Zhou và cộng sự [4] sử dụng mô hình CFD ba chiều đánh giá hiệu suất thu năng lượng của các loại phao trong bể sóng số, đồng thời nhiều công trình khác tập trung vào tối ưu damping và bố trí thiết bị nhằm tăng hiệu quả thu nhận năng lượng sóng [5,6].

Tại Việt Nam, đặc trưng sóng ven bờ với biên độ nhỏ, biến đổi theo mùa đã thúc đẩy nghiên cứu phát triển phao tối ưu dựa trên phân tích thể tích chìm và tỷ lệ chìm phù hợp khí hậu nhiệt đới, thủy văn đặc thù [7]. Thuật toán tối ưu và mô phỏng thủy động học đã cải thiện hiệu suất thu tại các địa điểm như miền Trung và vịnh Hạ Long [8]. Ứng dụng cảm biến thông minh và điều khiển tự động giúp điều chỉnh dao động phao theo điều kiện thực tế, nâng cao hiệu suất chuyển đổi [9].

Phát triển máy phát điện năng lượng sóng theo hệ hấp thu tuyến tính đáp ứng hiệu suất, độ bền và ổn định, đúng kỹ thuật và môi trường ven bờ Việt Nam, mở triển vọng bền vững cho công nghệ năng lượng tái tạo trong và ngoài nước.

2. TÍNH CHỌN PHAO THU NĂNG LƯỢNG

Hệ tuyến tính là một cơ hệ gồm phao và các phần tử trong cơ hệ đều chuyển động tịnh tiến. Hệ tuyến tính được minh họa như hình sau:



Hình 1. Sơ đồ thu năng lượng sóng biển bằng phương pháp hệ tuyến tính

Hệ tuyến tính bao gồm ba bộ phận chính: bộ phận thu năng lượng sóng biển chuyển đổi thành năng lượng cơ học (cụm phao), bộ phận liên kết và bộ phận chuyển đổi năng lượng cơ học thành điện năng. Cơ chế hoạt động dựa trên dao động tịnh tiến của phao trên mặt sóng, truyền dẫn sang hệ

truyền động đơn giản, không sử dụng cơ cấu biến đổi phức tạp, qua đó giảm thiểu tổn thất cơ khí và chi phí bảo trì. Để tối ưu hiệu suất, kích thước phao phải được tính toán chính xác nhằm đạt lực tác động tối đa từ sóng biển. Phần tiếp theo trình bày các tính toán kích thước phao đối với các kiểu hình dạng nhằm xác định loại phao chịu được lực tác động lớn nhất.

2.1. Phao có dạng hình nón cụt

Giả sử phao có các kích thước lần lượt là: $0,4 \times 0,2 \times 0,5$ (m), khối lượng $m = 2$ (kg) và chiều cao của sóng trung bình đánh lên phao dựa theo bảng thống kê là $0,3$ (m) [2].

$$\text{Thể tích hình nón cụt là: } V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr) = \frac{1}{3}\pi \cdot 0,5(0,2^2 + 0,1^2 + 0,2 \cdot 0,1) \approx 0,0366(m^3) \quad (1)$$

$$\text{Thể tích phần phao chìm là: } V_c = \frac{3}{5}V = \frac{3}{5} \cdot 0,0366 = 0,0219(m^3) \quad (2)$$

$$\text{Trọng lượng của phao: } P = mg = 2 \cdot 9,81 = 19,62(N) \quad (3)$$

$$\text{Lực đẩy Acsimet tác dụng lên phao: } F_a = d \cdot V_c = 1000 \cdot 0,0219 = 21,9(N) \quad (4)$$

Thấy $F_a > P$ nên phao sẽ nổi trên mặt nước.

$$\text{Diện tích xung quanh của phao: } S_{xq} = \pi l(R + r) = \pi \sqrt{0,5^2 + (0,2 - 0,1)^2} \cdot (0,2 + 0,1) = 0,48(m^2) \quad (5)$$

$$\text{Diện tích phần cản sóng của phao: } S_c = \frac{3}{5} \left(\frac{1}{2} S_{xq} \right) + S_d = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,48 + \pi \cdot 0,1^2 \approx 0,175(m^2) \quad (6)$$

$$\text{Áp lực sóng: } F_{al} = v \cdot S_c = 10 \cdot 0,175 = 1,75(Pa) \quad (7)$$

2.2. Phao có dạng hình cầu

Giả sử phao có đường kính $D = 0,4$ (m), khối lượng $m = 2$ (kg) và chiều cao của sóng đánh lên phao là $0,3$ (m)

$$\text{Thể tích phao hình cầu: } V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 0,2^3 = 0,0335(m^3) \quad (8)$$

$$\text{Thể tích phần chìm của phao: } V_c = \frac{3}{5}V = \frac{3}{5} \cdot 0,0335 = 0,0201(m^3) \quad (9)$$

$$\text{Trọng lượng của phao: } P = mg = 2 \cdot 9,81 = 19,62(N) \quad (10)$$

$$\text{Lực đẩy Acsimet tác dụng lên phao: } F_a = d \cdot V_c = 1000 \cdot 0,0201 = 20,1(N) \quad (11)$$

Thấy $F_a > P$ nên phao sẽ nổi trên mặt nước.

$$\text{Diện tích phần cản sóng của phao: } S_c = \frac{3}{5} \left(\frac{1}{2} S_{xq} \right) = \frac{3}{5} \left(\frac{1}{2} \cdot 4\pi r^2 \right) = \frac{3}{40}\pi \approx 0,15(m^2) \quad (12)$$

$$\text{Áp lực sóng: } F_{al} = v \cdot S_c = 10 \cdot 0,15 = 1,5(Pa) \quad (13)$$

2.3. Phao có dạng hình trụ tròn

Giả sử phao có kích thước đường kính và chiều cao lần lượt là: $0,3 \times 0,5$ (m), khối lượng $m = 2$ (kg) và chiều cao của sóng đánh lên phao là $0,3$ (m).

$$\text{Thể tích phao hình trụ tròn: } V = \pi r^2 \cdot h = \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,5 = 0,0353(m^3) \quad (14)$$

$$\text{Thể tích phần chìm của phao: } V_c = \frac{3}{5}V = \frac{3}{5} \cdot 0,0353 = 0,02118(m^3) \quad (15)$$

$$\text{Trọng lượng của phao: } P = mg = 2 \cdot 9,81 = 19,62(N) \quad (16)$$

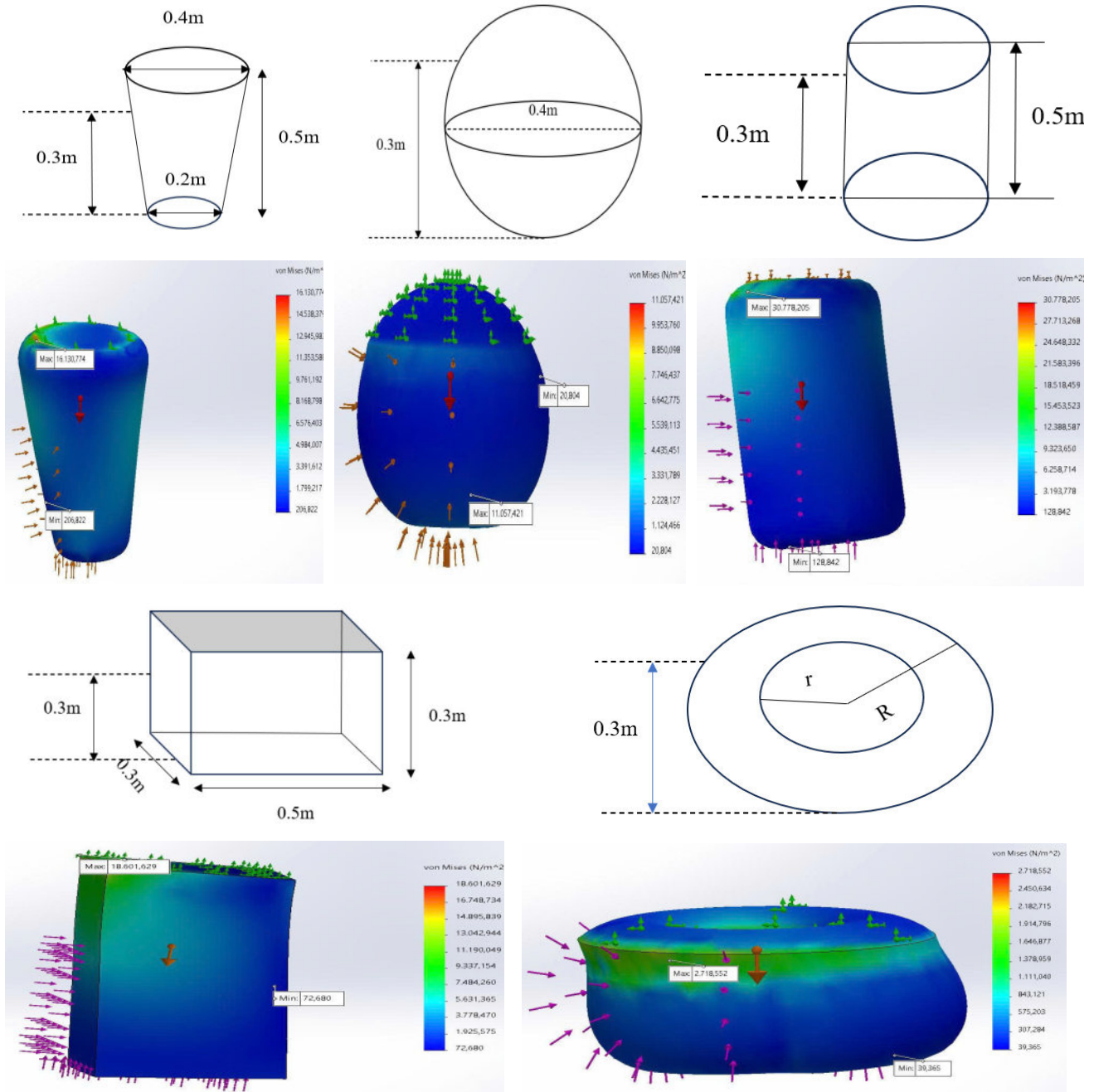
$$\text{Lực đẩy Acsimet tác dụng lên phao: } F_a = d \cdot V_c = 1000 \cdot 0,02118 = 21,18(N) \quad (17)$$

Thấy $F_a > P$ nên phao sẽ nổi trên mặt nước.

$$\text{Diện tích xung quanh của phao: } S_{xq} = 2\pi.r.h = 2\pi.0,15.0,5 = 0,471(m^2) \quad (18)$$

$$\text{Diện tích phần cản sóng của phao: } S_c = \frac{3}{5}\left(\frac{1}{2}S_{xq}\right) + S_d = \frac{3}{5}\left(\frac{1}{2}.0,471\right) + \pi.0,15^2 \approx 0,212(m^2) \quad (19)$$

$$\text{Áp lực sóng: } F_{al} = v.S_c = 10.0,212 = 2,12(Pa) \quad (20)$$



Hình 2. Kích thước các dạng phao tính toán và kết quả mô phỏng chịu lực tương ứng của các loại phao trong Solidwork

2.4. Phao có dạng hình hộp chữ nhật

Giả sử phao có các kích thước lần lượt là: 0,3 x 0,3 x 0,5 (m), khối lượng $m = 2$ (kg) và chiều cao của sóng đánh lên phao là 0,3 (m).

$$\text{Thể tích phao hình hộp chữ nhật: } V = a.b.c = 0,3.0,3.0,5 = 0,045(m^3) \quad (21)$$

$$\text{Thể tích phần chìm của phao: } V_c = \frac{3}{5}V = \frac{3}{5}.0,045 = 0,027(m^3) \quad (22)$$

$$\text{Trọng lượng của phao: } P = mg = 2.9,81 = 19,62(N) \quad (23)$$

$$\text{Lực đẩy Acsimet tác dụng lên phao: } F_a = d.V_c = 1000.0,027 = 27(N) \quad (24)$$

Thấy $F_a > P$ nên phao sẽ nổi trên mặt nước.

$$\text{Diện tích phần cản sóng của phao: } S_c = \frac{3}{5}a.h + S_d = \frac{3}{5}.0,3.0,5 + 0,3.0,3 \approx 0,18(m^2) \quad (25)$$

$$\text{Áp lực sóng: } F_{al} = v.S_c = 10.0,18 = 1,8(Pa) \quad (26)$$

2.5. Phao có dạng hình vành khăn

Giả sử phao có kích thước đường kính lớn $R = 0,5$ (m), đường kính nhỏ $r = 0,3$ (m), khối lượng $m = 2$ kg và chiều cao của sóng đánh lên phao là $0,3$ (m).

$$\begin{aligned} V &= 2\pi^2 \left(\frac{R+r}{2} \right) \left(\frac{R-r}{2} \right)^2 \\ \text{Thể tích phao hình vành khăn:} \\ &= 2\pi^2 \left(\frac{0,25+0,15}{2} \right) \left(\frac{0,25-0,15}{2} \right)^2 = 0,0098(m^3) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{Thể tích phần chìm của phao: } V_c = V = 0,0098(m^3) \quad (28)$$

$$\text{Trọng lượng của phao: } P = mg = 2.9,81 = 19,62(N) \quad (29)$$

$$\text{Lực đẩy Acsimet tác dụng lên phao: } F_a = d.V_c = 1000.0,0098 = 9,8(N) \quad (30)$$

Thấy $F_a < P$ nên phao sẽ chìm.

Từ các kết quả mô phỏng lực tác dụng với 5 loại hình dạng phao (Hình 2) có bảng tổng hợp kết quả như sau:

Bảng 1. Kết quả mô phỏng chịu lực của các dạng phao

Hình dạng phao	Lực tác dụng của sóng	Độ biến dạng lớn nhất
Hình nón cụt	100N	16,130 (N/m ²)
Hình cầu	100N	11,057 (N/m ²)
Hình trụ tròn	100N	30,778 (N/m ²)
Hình hộp chữ nhật	100N	18,601 (N/m ²)
Hình vành khăn	100N	2,718 (N/m ²)

Kết quả mô phỏng SolidWorks cho thấy, dưới lực tác động giá thiết 100N, phao trụ tròn có độ biến dạng lớn nhất (30,778(N/m²)), cho thấy khả năng hấp thụ lực tối ưu. Điều này tương ứng với nguyên lý hấp thụ tuyến tính, trong đó hiệu quả chuyển đổi năng lượng phụ thuộc vào dao động và biến dạng của phao.

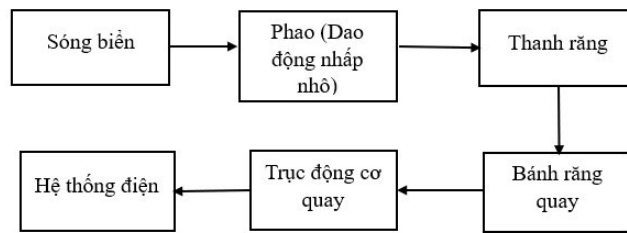
Áp lực sóng tập trung tại đỉnh và đáy phao do diện tích tiếp xúc lớn, tối đa hóa năng lượng thu nhận đồng thời đảm bảo độ bền cơ học. Hình dạng trụ tròn với diện tích tiếp xúc nước đồng đều quanh thân giúp giảm lực cản không đều, tăng sự ổn định và hạn chế dao động ngang.

Phân tích định lượng cho thấy phao trụ tròn tạo ra biên độ dao động tịnh tiến lớn cùng mômen xoắn hiệu quả, tối ưu hóa chuyển đổi năng lượng sóng thành cơ năng. So với hình cầu, nón cụt và hộp chữ nhật, phao trụ tròn có diện tích tiếp xúc và thể tích chìm vừa phải, đạt hiệu suất cạnh tranh trong sóng nhẹ đến vừa và có ưu thế về tính ổn định.

Dù phao hộp chữ nhật thu năng lượng cao hơn trong điều kiện dao động lý tưởng, phao trụ tròn phù hợp hơn điều kiện sóng phức tạp và dễ dàng điều chỉnh cấu trúc cho nhiều dạng sóng. Sự cân bằng giữa công suất và độ bền cơ học khiến phao trụ tròn là lựa chọn tối ưu cho hệ thống thực tế, đáp ứng yêu cầu hiệu quả và khả thi trong sản xuất, lắp đặt.

3. THIẾT KẾ HỆ THỐNG

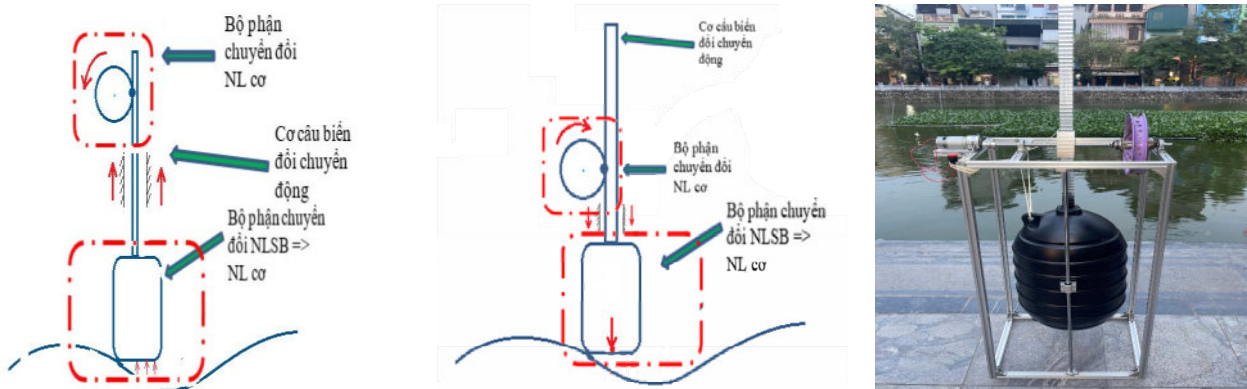
Sơ đồ khối của hệ thống chuyển đổi năng lượng sóng thành năng lượng điện sử dụng phương pháp hệ hấp thu tuyến tính như sau:



Hình 3. Sơ đồ khối của hệ thống

Nguyên lý hoạt động của hệ thống như sau:

Nguyên lý hoạt động của hệ thống được trình bày như sau: Khi sóng biển tác động, phao chỉ chuyển động lên xuống do cơ cấu giới hạn phương ngang; thanh răng gắn với phao chuyển động tịnh tiến khiến bánh răng quay nhờ ăn khớp răng. Ở bi một chiều cho phép xuất momen quay và truyền động chỉ khi phao chuyển động lên, nhờ đó động cơ đồng trục với bánh răng phát điện một chiều. Khi phao đi xuống do trọng lực và tác động sóng, ở bi một chiều ngắt truyền động, bánh răng và trục không quay, phao trở về vị trí ban đầu trên mặt nước.



Hình 4. Nguyên lý hoạt động của hệ thống và thiết bị sau khi chế tạo và lắp ráp hoàn chỉnh

Với nguyên lý hoạt động như trên, toàn bộ hệ thống thiết bị phát điện sử dụng năng lượng sóng biển bằng phương pháp hấp thu tuyến tính đã được thiết kế và lắp ráp hoàn thiện như hình 4.

4. THỰC NGHIỆM

Thử nghiệm thiết bị nhằm đảm bảo hoạt động ổn định và hiệu quả, với điện áp đầu ra đo được duy trì ổn định trong khoảng 3,5–5 V, phản ánh công suất còn hạn chế do quy mô mô hình nhỏ. Hiệu suất chuyển đổi năng lượng dao động từ 28–40% trong điều kiện sóng nhẹ, tương ứng với các nghiên cứu trong và ngoài nước về phao nổi sử dụng động cơ một chiều và truyền động tuyến tính.



Hình 5. Kết quả phát điện thử nghiệm của mô hình khi thí nghiệm

Hiệu suất giới hạn bởi tổn thất cơ khí trong truyền động, lực cản thủy động và dao động không đều của sóng. Công suất bị ảnh hưởng bởi biên độ sóng nhỏ, chỉ khai thác chuyển động lên của phao, tốc độ quay motor thấp chưa tối ưu cùng các tác động môi trường như gió và dòng chảy gây biến động vận hành.

Nhận xét: Thiết kế sử dụng chuyển động lên qua cơ cấu thanh răng–bánh răng và ổ bi một chiều, loại bỏ tổn thất khi phao chuyển động xuống, phù hợp với nguyên lý truyền động một chiều trong hệ thu năng lượng tuyến tính.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phân tích cơ chế hấp thu năng lượng sóng biển qua nguyên lý hấp thu tuyến tính, từ đó xác định kích thước phao tối ưu nhằm nâng cao hiệu suất thu năng lượng. Thiết kế này phù hợp với đặc thù sóng ven bờ Việt Nam, tạo ra điện áp đầu ra khoảng 4V và đã thử nghiệm thành công khi cấp sáng đèn LED. Thiết kế mới chỉ khai thác chuyển động lên của phao và công suất còn hạn chế, nghiên cứu sẽ tiếp tục tập trung tối ưu kích thước phao và các yếu tố như độ chìm, biên độ dao động, cộng hưởng, cùng hình học phao để cải thiện hiệu quả trong các điều kiện môi trường đa dạng.

Định hướng phát triển nghiên cứu sẽ mở rộng quy mô nguyên mẫu và thử nghiệm ngoài khơi đa dạng sóng gió; ứng dụng mô phỏng CFD đa chiều và mô hình phi tuyến để tối ưu thiết kế và giảm lực cản thủy động; nghiên cứu cộng hưởng sóng và điều khiển thông minh nhằm tự động điều chỉnh dao động tối ưu công suất; phát triển hệ lưu trữ điện năng và quản lý năng lượng cho vận hành liên tục và ứng dụng thực tế ở Việt Nam.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Thủy lợi trong đề tài mã số CS2025-6. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Thủy lợi đã tài trợ kinh phí thực hiện đề tài này.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Babarit, A. 2015. A review of wave energy converter technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 310–319.
- [2] Babarit, A., & Hals, J. 2014. Numerical modeling of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 97, 107–129.
- [3] Thomas, G., Babarit, A., & Clement, A. 2016. Hydrodynamic modeling for wave energy systems. *Renewable Energy*, 87, 1055–1065.
- [4] Zhou X, Cheng Z, Xia H, Zhao Z and Liu S. 2024. Power absorption and flow-field characteristics analysis for oscillating coaxial twin-buoy wave energy converter by using CFD. *Front. Energy Res.*
- [5] Wildan Amarullah Arrosyid et al. 2025. Recent advancements in wave energy converter technologies: A comprehensive review on design and performance optimization. *Ocean Engineering*. Volume 340, Part 2.
- [6] Falnes, J., et al. 2023. Advances in Wave Energy Converters Based on Floating Buoys: Simulation and Experimental Studies. *Renewable Energy Journal*.
- [7] Nguyễn, V. H., Trần, T. T., & Phạm, Q. T. 2020. Nghiên cứu thiết kế phao nổi tối ưu cho khai thác năng lượng sóng biển tại vùng biển nhiệt đới Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển*, 19(1), 45–54.
- [8] Trần, T. T., Nguyễn, H. M., & Lê, V. K. (2021). Tối ưu hình học phao thu năng lượng sóng trong điều kiện sóng ven bờ Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 59(4), 123–135.
- [9] Phạm, H. T., Lê, M. T., & Vũ, K. N. (2023). Ứng dụng hệ thống điều khiển thông minh trong máy phát điện năng lượng sóng biển. *Tạp chí Điều khiển và Tự động hóa*, 36(2), 98–110.