■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2026

Thuật toán điều khiển học lặp cho hệ thống lái tàu thủy tự động

A study on an iterative learning controller for the ship course keeping control system

> THS NGUYỄN VĂN THỊNH, PGS.TS NGUYỄN VĂN SƯỚNG*, THS PHẠM QUANG THỦY
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenvansuong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Trong tương lai, để tự động hoàn toàn việc điều khiển các tàu thủy, hệ thống lái tự động đòi hỏi phải có độ chính xác và khả năng thích ứng cao hơn so với các hệ thống lái PID hiện nay vốn còn nhiều hạn chế khi đối mặt với nhiễu môi trường và sai số trong mô hình tàu. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất thuật toán điều khiển học lặp (ILC) nhằm nâng cao hiệu suất giữ hướng cho các hệ thống lái tàu thủy. Khác với thuật toán PID truyền thống, thuật toán ILC sử dụng thông tin từ các chu kỳ vận hành trước đó để điều chỉnh tín hiệu điều khiển bánh lái, từ đó triệt tiêu sai số bám một cách hiệu quả trong các bước lặp tiếp theo. Để kiểm nghiệm thuật toán đề xuất, các mô phỏng được thực hiện trên MATLAB. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán ILC cho hiệu quả cao hơn trong việc giữ hướng tàu thủy so với bộ điều khiển PID truyền thống. Nghiên cứu này cung cấp một hướng tiếp cận mới cho việc phát triển các thế hệ lái tàu tự hành thông minh trong tương lai.

Từ khóa: Tàu thủy tự hành; hệ thống lái tàu thủy; điều khiển học lặp; mô hình động lực học tàu thủy.

ABSTRACT

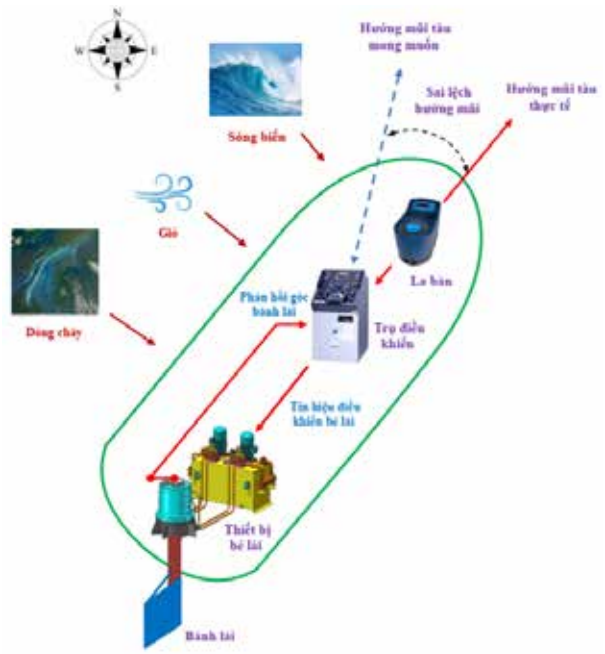
In the future, to achieve fully autonomous ship control, autopilot systems will require higher precision and adaptability than current PID steering systems, which face significant limitations when dealing with environmental disturbances and modeling uncertainties. In this study, we propose an Iterative Learning Control (ILC) algorithm to enhance the course-keeping performance of ship steering systems. Unlike traditional PID algorithms, ILC utilizes information from previous operating cycles to adjust the rudder control signals, effectively eliminating tracking errors in subsequent iterations. To validate the proposed algorithm, simulations were conducted on MATLAB. The results demonstrate that the ILC algorithm achieves superior course-keeping efficiency compared to traditional PID controllers. This research provides a new approach for developing the next generation of intelligent autonomous ship steering systems.

Keywords: Autonomous ship; ship steering system; iterative learning control; ship dynamic model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu về tàu thủy tự hành không người lái đã thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu, nhiều quốc gia trên thế giới như một lĩnh vực hót về đóng tàu và vận tải hàng hải. Trong tương lai, các tàu thủy tự hành không người lái có thể thực hiện các nhiệm vụ quan trọng như: Tìm kiếm cứu nạn ở các vùng biển có thời tiết khắc nghiệt; thực hiện các công việc ngầm dưới mặt nước phức tạp; bảo vệ môi trường biển… Để có thể điều khiển được các tàu thủy tự hành cần thiết phải có hệ thống lái tàu (Hình 1) có đủ hiệu quả cần tính toán đến các yếu tố ngoại cảnh, độ sâu, lực cản…, do vậy nghiên cứu và phát triển các hệ thống lái luôn nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu.

Xét về lý thuyết, để thiết kế được hệ thống lái tàu tự động cần thiết phải biết được mô hình toán học của đối tượng điều khiển, từ mô hình toán sẽ phát sinh ra các bài toán khác nhau về tự động điều khiển. Trong nghiên cứu [3, 4], các bộ điều khiển PID đã được đề xuất cho hệ thống lái tàu thủy, ưu điểm của hệ thống điều khiển là đơn giản, dễ hiệu chỉnh. Tuy nhiên, với bộ điều khiển này thường xuyên sẽ có những lượng quá điều chỉnh và thời gian đi vào ổn định dài gây chất lượng chưa được tốt trong quá trình điều khiển. Bên cạnh đó, khi tham số của hệ thống điều khiển thay đổi, chất lượng điều khiển của hệ thống cũng không được tốt. Dựa trên tiếp cận điều khiển thích nghi theo mô hình mẫu [5], một hệ thống điều khiển đã được đề xuất cho hệ thống lái tàu thủy tự hành kết hợp với logic mờ.



Hình 1. Sơ đồ tổng quan hệ thống lái tàu thủy

Phương pháp điều khiển mô hình dự đoán [6] được nghiên cứu mang lại những kết quả tích cực. Trong nghiên cứu [7], một hệ thống điều khiển tự động đã được đề xuất cho hệ thống lái tàu thủy tự hành đề cập đến hai chong chóng động lực. Nghiên cứu [8] ứng dụng bộ điều khiển thích nghi logic mờ, trong nghiên cứu này logic mờ được đề cập để giải quyết bài toán tính không chắc chắn của mô hình tàu và nhiễu ngoài tác dụng. Mặt khác, các nghiên cứu [9, 10, 11] đề xuất các bộ điều khiển cuốn chiếu để giải bài toán lái tàu tự động giữ hướng, tuy nhiên việc sử dụng phương pháp điều khiển này sẽ gặp phải bài toán phức tạp khi phải tính tín hiệu ảo trên nhiều bước, do vậy gây ra sự phức tạp trong hệ thống điều khiển. Ngoài ra, điều khiển trượt trong [12] cũng được ứng dụng trong hệ thống lái tàu thủy tự động với những ưu điểm nhất định. Hạn chế của bộ điều khiển này là tồn tại hiện tượng rung có thể gây ra ảnh hưởng tiêu cực đến hệ thống.

Mặc dù những nghiên cứu nêu trên đã thu được nhiều kết quả đáng kể, tuy nhiên việc ứng dụng các luật điều khiển hiện đại như trên vào thực tiễn gặp nhiều thách thức vì yêu cầu phải trang bị nhiều loại cảm biến hiện đại và khối lượng tính toán phức tạp. Do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một thuật toán điều khiển dựa trên lý thuyết điều khiển học lặp cho hệ thống lái tàu thủy tự động. Bộ điều khiển với thuật toán đề xuất cho phép nâng cao hiệu quả giữ hướng tàu thủy tự động so với bộ điều khiển PID truyền thống nhờ khả năng học lặp. Bên cạnh đó, việc ứng dụng thuật toán điều khiển này là khả thi với các tàu biển hiện nay cũng như các tàu thủy tự hành trong tương lai.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC HỆ THỐNG LÁI TÀU THỦY

Để thiết kế hệ thống tự động lái tàu theo hướng, cần phải biết được mô hình động lực học (mô hình toán học) của con tàu. Cho đến nay, mô hình nổi tiếng nhất được dùng để xây dựng hệ thống máy lái tàu thủy tự động là mô hình Nomoto [2, 13], cụ thể mô hình thể hiện mối quan hệ động học giữa góc bẻ bánh lái (δ) và góc hướng mũi tàu (Ψ) ở dạng hàm truyền:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1+T_3 s)}{s(1+T_1 s)(1+T_2 s)} \quad (1)$$

Trong đó, các tham số K, T_1, T_2, T_3 đặc trưng cho động học của tàu, với mỗi tàu khác nhau các tham số động học này sẽ khác nhau. Để đơn giản hóa trong việc thiết kế bộ điều khiển cho máy lái tự động tàu thủy, người ta thường xuyên sử dụng mô hình động học dưới đây:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad (2)$$

Trong mô hình (2) này, các hệ số K và T này cũng là các tham số động lực học. Để tìm các tham số này, người ta có thể xây dựng mô hình vật lý thu nhỏ của con tàu hoặc sử dụng tàu thực. Bằng cách cho tàu quay trở hết một vòng với điều kiện cho góc bẻ bánh lái δ cố định và ghi lại tất cả các giá trị góc hướng tàu (Ψ) thay đổi theo thời gian, sau đó sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để khớp các bộ dữ liệu thu được sẽ tính toán được các hệ số K và T này.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng mô hình (2) để thiết kế luật điều khiển học lặp cho hệ thống lái tàu thủy tự động. Cần chuyển mô hình (2) sang dạng không gian trạng thái và rời rạc hóa theo các bước thời gian.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VÀ PHÂN TÍCH TÍNH HỘI TỤ

Đặt $x_1 = \psi, x_2 = \dot{\psi} = r$, mô hình (2) được chuyển sang dạng không gian trạng thái và rời rạc như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}(\tau+1) = A\underline{x}(\tau) + \underline{b}u(\tau) \\ y(\tau) = \underline{c}^T \underline{x}(\tau) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: $\underline{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \underline{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}, \underline{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}$. Mô hình (3) là mô hình rời rạc của mô hình hàm truyền (2) với $\tau = 0, 1, \ldots N$, trong đó N là tỉ số T/T_S có T_S là chu kỳ lấy mẫu tín hiệu. Như vậy, tại lần thử thứ k, ánh xạ $f(\,)$ mô tả quan hệ vào ra của hệ là:

$$f(): u_k(\tau) \mapsto \underline{c}^T A^{\tau} \underline{x}_k(0) + \sum_{i=0}^{\tau-1} \underline{c}^T A^{\tau-i-1} \underline{b} u_k(i) \quad (4)$$

Sử dụng hàm học tuyến tính kiểu PD cho hệ thống (3) như sau:

$$u_{k+1}(i) = u_k(i) + K_P e_k(i) + K_d e_k(i+1) \quad (5)$$

Thay hàm học (5) vào hệ thống (3) ở lần thử thứ k, sai lệch bám hướng tàu sẽ là:

$$e_{k+1}(\tau) = (1 - \underline{c}^T \underline{b} K_d) e_k(\tau) - \sum_{i=0}^{\tau-1} \underline{c}^T A^{\tau-i-1} \underline{b} K_P e_k(i) - \sum_{i=0}^{\tau-2} \underline{c}^T A^{\tau-i-1} \underline{b} K_d e_k(i+1) \quad (6)$$

Từ (6), ta suy ra:

$$\begin{pmatrix} e_{k+1}(0) \\ e_{k+1}(1) \\ \ldots\ldots\ldots \\ e_{k+1}(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \underline{c}^T \underline{b} K_d & 0 & \ldots & 0 \\ \underline{c}^T \underline{b} K_P & 1 - \underline{c}^T \underline{b} K_d & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ -\underline{c}^T A^{N-1} \underline{b} K_P & -\underline{c}^T A^{N-2} (K_P + AK_d) \underline{b} K_d & \ldots & 1 - \underline{c}^T \underline{b} K_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_k(0) \\ e_k(1) \\ \ldots\ldots \\ e_k(N) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Hay viết dưới dạng:

$$\underline{e}_{k+1}^{Pd} = (I - \phi_{Pd}) \underline{e}_k^{Pd} \quad (8)$$

Trong đó:

$$\underline{e}_k^{Pd} = \begin{pmatrix} e_k(0) \\ e_k(1) \\ \ldots\ldots \\ e_k(N) \end{pmatrix}$$

và $\phi_{Pd} = \left(\varphi_{ij}^{Pd}\right)$, i, j = 1, 2, ..., N+1 là ma trận vuông có các phần tử φ_{ij}^{Pd} được xác định theo hệ thức:

$$\varphi_{ij}^{Pd} = \begin{cases} 0 \quad \text{khi } i < j \\ \underline{c}^T \underline{b} K_d \quad \text{khi } i = j \\ \underline{c}^T A^{i-j-1} (K_P + AK_d) \underline{b} \quad \text{khi } i > j \end{cases} \quad (9)$$

Từ hệ thức (8), ta suy ra:

$$\left\| \underline{e}_{k+1}^{Pd} \right\| \le \left\| (I - \phi_{Pd}) \right\| \left\| \underline{e}_k^{Pd} \right\| \quad (10)$$

Để có được $\left\| \underline{e}_{k+1}^{Pd} \right\| \le \left\| \underline{e}_k^{Pd} \right\|$ ta cần điều kiện như sau:

$$\left\| (I - \phi_{Pd}) \right\| < 1 \quad (11)$$

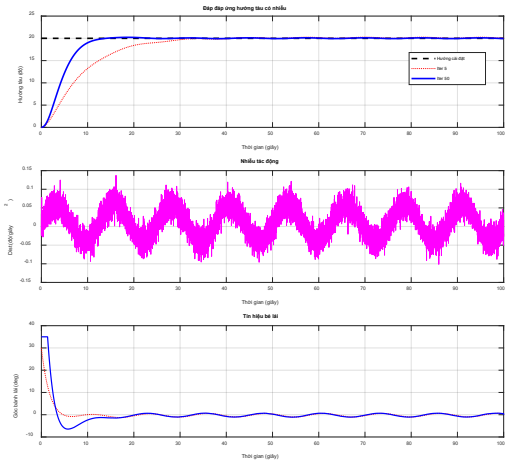
Theo điều kiện (11), hệ thống điều khiển tàu thủy tự động với bộ điều khiển học lặp theo kiểu PD sẽ đảm bảo hội tụ, tức là các sai số sẽ tiến về 0 với các bước học đủ lớn.

Như vậy, có thể thấy rằng, với thuật toán điều khiển học lặp đề xuất trong hệ thức (5), bộ điều khiển có cấu trúc đơn giản và dễ dàng được cài đặt trong các hệ thống lái tàu thủy tự động ngày nay.

4. MÔ PHỎNG SỐ

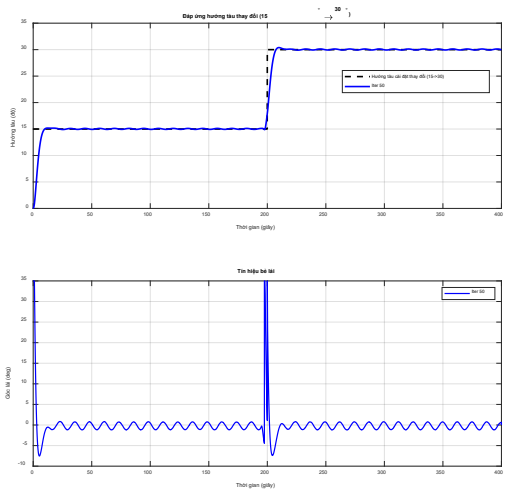
Để kiểm chứng tính khả thi của thuật toán điều khiển học lặp cho hệ thống lái tàu thủy tự động, mô phỏng số được thực hiện trên MATLAB. Tham số mô hình động lực học hệ thống [2] lần lượt là K = 0,5 và T = 10. Hàm học được lựa chọn theo kiểu PD với các tham số: K_p = 1,5; K_d = 1,2; nhiễu tác động tổng hợp bởi hàm d = 0,05. sin(0,5t)+0,02.w(t) + 0,01 với w(t) là nhiễu trắng với phương sai 1. Góc bánh lái được giới hạn 35 độ về hai phía. Mô phỏng được thực hiện với hai kịch bản giữ hướng và thay đổi hướng, cụ thể:

Kịch bản 1: Tàu được yêu cầu giữ hướng 20 độ, thời gian mô phỏng là 100 giây, thời gian lấy mẫu là 0,01 giây. Hình 2 chỉ ra kết quả bám hướng đi cài đặt theo yêu cầu, theo đó hiệu quả bám hướng đạt tốt nhất tại lần học 50 với thời gian ổn định tại 14 giây so với 32 giây của lần học thứ 5.



Hình 2. Kết quả điều khiển tàu thủy giữ hướng 20 độ với bộ điều khiển ILC

Kịch bản 2: Tàu được yêu cầu thay đổi hướng từ 15 độ sang 30 độ, thời gian mô phỏng là 400 giây, thời gian lấy mẫu là 0,01 giây như kịch bản 1. Hình 3 chỉ ra kết quả bám khi thay đổi hướng bám ở lần học thứ 50, theo đó ở giai đoạn 1 khi tàu bám hướng 15 độ, hiệu quả bám tốt, trong khi khi chuyển sang bám hướng 30 độ ở giây thứ 200 có xu hướng bị quá điều chỉnh một lượng nhỏ.



Hình 3. Kết quả điều khiển đổi hướng từ 15 độ sang 30 độ với bộ điều khiển ILC

Từ các kết quả trên, có thể thấy rằng hiệu quả điều khiển lái tàu thủy tự động bằng thuật toán điều khiển học lặp là rất tốt ngay cả khi nhiễu ngoại cảnh cũng như sai số trong mô hình tác động. Vì luật điều khiển học lặp phụ thuộc vào sai số bám hướng tàu thực tế ở những bước học trước, do vậy nó hoạt động không phụ thuộc hoàn toàn vào mô hình của hệ thống. Ngoài ra, so với các thuật toán trước đây, thuật toán cũng không yêu cầu quá nhiều cảm biến và khối lượng tính toán phức tạp, do vậy thuật toán điều khiển học lặp có tính khả thi để áp dụng trên các tàu thủy cũng như tàu thủy tự hành không người lái trong tương lai.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã đề xuất một bộ điều khiển học lặp cho hệ thống lái tàu thủy tự động. Bộ điều khiển học lặp có thể học và chỉnh định tín hiệu điều khiển sau mỗi bước học để đưa sai số bám hướng tàu về bằng 0. Vì tính đơn giản và thông minh của thuật toán điều khiển, bộ điều khiển có tính khả thi để được ứng dụng trong các tàu thủy hiện tại cũng như tàu thủy không người lái trong tương lai. Kết quả mô phỏng số đã kiểm chứng được hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Trong những nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi sẽ thực hiện tích hợp các kỹ thuật hiện đại khác như: thích nghi, bộ quan sát… vào luật điều khiển học lặp để giải quyết các bài toán khác nhau trong hệ thống tự động lái tàu thủy.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số: DT.25-26.04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Thu Hà, Nguyễn Hoài Nam, Nguyễn Doãn Phước. Điều khiển học lặp. NXB. Đại học Bách khoa Hà Nội, 2021.

[2] TS Nguyễn Văn Sướng. Tự động điều khiển tàu thủy. NXB. Đại học Hàng hải, 2021.

[3] Roberts GN, Sutton R, Zirilli A, et al. Intelligent ship autopilots: a historical perspective. Mechatronics 2003; 13: 1091-1103.

[4] Das S and Talole SE. Robust steering autopilot design for marine surface vessels. IEEE J Oceanic Eng, 41: 913-922, 2016.

[5] Yang Y, Zhou C and Ren J. Model reference adaptive robust fuzzy control for ship steering autopilot with uncertain nonlinear systems. Appl Soft Comp J, 3: 305-316, 2003.

[6] Park JH, Shim HW, Jun BH, et al. A model estimation and multi-variable control of an unmanned surface vehicle with two fixed thrusters. In: Oceans, Sydney, NSW, Australia, 24-27, pp. 1-5, New York: IEEE, May 2010.

[7] Sharma SK, Sutton R, Motwani A, et al. Non-linear control algorithms for an unmanned surface vehicle. Proc IMechE, Part M: J Engineering for the Maritime Environment, 228: 146-155, 2014.

[8] Wang N, Er MJ, Sun JC, et al. Adaptive robust online constructive fuzzy control of a complex surface vehicle system. IEEE T Cybernetics, 46: 1511-1523, 2015.

[9] Xia G, Wu H and Shao X. Adaptive filtering backstepping for ships steering control without velocity measurements and with input constraints. Math Probl Eng, 1-9, 2014.

[10] Witkowska A and S´ mierzchalski R. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method. Int J Appl Math Comp, 22: 985-997, 2012.

[11] Liao YL, Pang YJ and Zhuang JY. Backstepping adaptive sliding mode control for unmanned surface vessel course tracking with water-jet-propelled. Appl Res Comp, 29: 82-84. 2012.

[12] Liu Z. Ship adaptive course keeping control with nonlinear disturbance observer. IEEE Access 2017, 5:17567-17575.

[13] Fossen. Thor. I.. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons Ltd, 2011.