



Điều khiển an toàn thời gian hữu hạn dựa trên hàm Lyapunov rào cản cho tàu mặt nước tự hành

A finite-time safety-critical control based on barrier Lyapunov function for autonomous surface vessels

Cao Văn Bính*, Đàm Văn Tùng, Phạm Văn Triệu

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Từ khóa:

TÓM TẮT

Điều khiển an toàn
Điều khiển thời gian
hữu hạn
Ổn định Lyapunov
Tàu mặt nước

Trong những năm gần đây, việc đảm bảo tính ổn định và an toàn vận hành của các hệ thống tàu mặt nước tự hành trong môi trường biển phức tạp đã trở thành một thách thức quan trọng trong nghiên cứu và phát triển các chiến lược điều khiển. Trong bài báo này, một phương pháp điều khiển an toàn thời gian hội tụ hữu hạn được đề xuất nhằm bảo đảm khả năng vận hành chính xác và ổn định của tàu. Trước hết, một bộ điều khiển cuốn chiếu kết hợp với hàm Lyapunov rào cản được phát triển để duy trì hệ thống trong một không gian làm việc an toàn. Tiếp theo, tính ổn định của hệ thống vòng kín được chứng minh chặt chẽ dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Bên cạnh đó, thời gian hội tụ của các sai lệch được xác định rõ ràng, giúp người vận hành có thể điều chỉnh các tham số điều khiển theo từng yêu cầu cụ thể của các ứng dụng thực tế. Cuối cùng, hiệu quả của phương pháp được xác minh thông qua các kết quả mô phỏng số và so sánh với những bộ điều khiển tiên tiến hiện có, khẳng định tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp đề xuất.

Keywords:

ABSTRACT

Safety-critical
control
Finite-time control
Lyapunov stability
Surface vessels

In recent years, ensuring the stability and safety of unmanned surface vessels in complex marine environments has become a critical challenge in the research and development of control strategies. In this paper, a finite-time safety-critical control method is proposed to ensure the accurate and stable operation of surface vessels. Firstly, a backstepping-based controller integrated with a Lyapunov barrier function is developed to maintain the system in a safe working space. Next, the stability of the closed-loop system is rigorously demonstrated based on the Lyapunov stability theory. In addition, the convergence time of tracking errors is explicitly derived, facilitating the operator to adjust the control parameters according to the specific requirements of practical applications. Finally, the effectiveness of the method is verified through numerical simulation results and compared with several existing state-of-the-art controllers, confirming the feasibility and reliability of the proposed method.

* Cao Văn Bính. Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Email: caovanbinh@vimaru.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150209>

Ngày nhận bài: 03/11/2025; Ngày nhận bài sửa: 23/02/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Ngày nay, việc phát triển các chiến lược điều khiển cho tàu mặt nước tự hành đã trở thành một chủ đề nghiên cứu nhận được sự quan tâm sâu rộng của cộng đồng khoa học trong và ngoài nước, nhờ vào tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như vận tải biển, khảo sát đại dương, và quốc phòng – an ninh [1]. Tuy nhiên, đặc tính phi tuyến mạnh trong mô hình động lực học của tàu đã đặt ra nhiều thách thức trong việc thiết kế các bộ điều khiển có khả năng đảm bảo hiệu suất và độ ổn định cao. Bên cạnh đó, việc duy trì hoạt động của hệ thống trong miền vận hành an toàn đóng vai trò đặc biệt quan trọng nhằm bảo đảm tính khả thi và an toàn của tàu trong điều kiện môi trường phức tạp, chịu ảnh hưởng của nhiều như sóng, gió và dòng chảy. Trước những thách thức đó, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp điều khiển an toàn thời gian hội tụ hữu hạn dành cho các hệ thống tàu mặt nước tự hành nhằm bảo đảm hiệu suất vận hành ổn định và đáng tin cậy trong miền làm việc an toàn, đặc biệt đối với các ứng dụng thực tế có yêu cầu nghiêm ngặt về thời gian.

Trong lĩnh vực điều khiển tàu mặt nước tự hành, điều khiển tuyến tính là một trong các phương pháp được sử dụng phổ biến nhờ ưu điểm về tính đơn giản, dễ dàng thiết kế và triển khai trên thực tế. Các công trình tiêu biểu có thể kể đến như điều khiển PID [2], điều khiển tối ưu LQR [3], hay phản hồi trạng thái tuyến tính [4]. Tuy nhiên, sử dụng các xấp xỉ để tuyến tính hóa mô hình động lực học thường làm suy giảm tính chính xác trong việc mô tả các đặc trưng phi tuyến của hệ thống, từ đó ảnh hưởng đến chất lượng bám quỹ đạo khi ứng dụng trong điều kiện thực tế. Bên cạnh đó, các chiến lược điều khiển tối ưu cũng được phát triển nhằm tối ưu hóa khả năng vận hành của hệ thống, điển hình là điều khiển dựa trên học tăng cường [5], [6] và điều khiển dự báo mô hình (MPC) [7], [8]. Mặc dù đạt được các kết quả tiềm năng, những phương pháp này lại đòi hỏi cấu trúc điều khiển phức tạp và khối lượng tính toán cao, gây khó khăn cho việc áp dụng trên các nền tảng phần cứng trong các ứng dụng thời gian thực. Đặc biệt, các giải thuật học tăng cường [5], [6] tập trung vào khía cạnh thích nghi với môi trường vận hành biến động thay vì xem xét các yếu tố an toàn của hệ thống. Bên cạnh đó, các nghiên cứu trên chưa cung cấp các phân tích về thời gian ổn định của hệ thống,

yếu tố quan trọng trong các ứng dụng thực tế. Để xử lý hiệu quả đặc tính phi tuyến vốn có của tàu mặt nước, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào phương pháp điều khiển phi tuyến [9]–[20]. Chẳng hạn, các công trình [9]–[11] ứng dụng kỹ thuật cuốn chiếu cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo, trong khi các nghiên cứu [12]–[14] mở rộng thêm bằng cách tích hợp bộ quan sát nhiễu nhằm tăng cường hiệu suất vận hành của hệ thống. Nhằm khắc phục hiện tượng nhạy cảm với đạo hàm tín hiệu điều khiển ảo thường gặp trong các bộ điều khiển cuốn chiếu, các bộ điều khiển bề mặt động được đề xuất trong các nghiên cứu [15], [16], tích hợp một bộ lọc thông thấp giúp giảm thiểu ảnh hưởng của đạo hàm tín hiệu ảo. Ngoài ra, các hướng tiếp cận dựa trên điều khiển trượt cũng được quan tâm rộng rãi [17]–[20] nhờ khả năng đảm bảo tính bền vững của hệ thống trước một số bất định và nhiễu. Đáng chú ý, nghiên cứu [17] đã kết hợp điều khiển trượt với lý thuyết bậc phân số và bộ quan sát trạng thái sử dụng mạng nơ-ron, góp phần nâng cao hiệu suất điều khiển đồng thời giảm phụ thuộc vào cảm biến đo. Hơn nữa, các công trình [18]–[20] còn mở rộng bằng cách tích hợp thêm các cơ chế thích nghi nhiễu, qua đó tăng cường tính ổn định và khả năng bền vững của hệ thống trong môi trường biển phức tạp. Mặc dù đạt được nhiều kết quả đáng kể, các nghiên cứu nêu trên hầu như chưa xem xét đến việc duy trì trạng thái hệ thống trong miền làm việc an toàn, một yếu tố then chốt bảo đảm tính khả thi và an toàn trong ứng dụng thực tế. Nhằm khắc phục khoảng trống này, một số hướng tiếp cận dựa trên điều khiển ràng buộc đầu ra đã được phát triển cho hệ thống tàu mặt nước [21] cũng như các hệ phi tuyến khác [22], [23]. Tuy nhiên, các phương pháp này chủ yếu giới hạn việc đảm bảo an toàn trong miền ràng buộc cố định, dẫn đến việc giảm tính linh hoạt và khả năng thích ứng trong môi trường vận hành thay đổi. Hơn nữa, thời gian hội tụ của hệ thống, yếu tố đặc biệt quan trọng đối với các ứng dụng yêu cầu nghiêm ngặt về thời gian, vẫn chưa được xem xét một cách đầy đủ trong các công trình hiện có.

Dựa trên các phân tích đề cập trên, nghiên cứu hiện tại đề xuất một phương pháp điều khiển an toàn thời gian hữu hạn cho các hệ thống tàu mặt nước tự hành. Bằng cách kết hợp kỹ thuật điều khiển cuốn chiếu với hàm Lyapunov rào cản,

phương pháp đề xuất cho phép duy trì hệ thống trong một không gian làm việc an toàn. Những đóng góp chính của bài báo được liệt kê như sau:

- Đảm bảo hệ thống vận hành trong miền ràng buộc biến thiên theo thời gian thay vì chỉ xem xét các miền ràng buộc cố định như các nghiên cứu [21]–[23], từ đó nâng cao tính tổng quát của phương pháp đề xuất;

- Tính ổn định của hệ thống vòng kín được kiểm chứng chặt chẽ thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov. Ngoài ra, nghiên cứu cung cấp cụ thể các phân tích lý thuyết về tính ổn định và thời gian hội tụ của hệ thống, qua đó cung cấp cơ sở điều chỉnh tham số đề phù hợp với từng ứng dụng thực tế.

Cấu trúc của bài báo bao gồm những nội dung như sau: Phần 2 là trình bày mô hình động lực học ba bậc tự do của tàu mặt nước; Phần 3 là thiết kế bộ điều khiển an toàn thời gian hữu hạn và phân tích tính ổn định của hệ thống; Phần 4 thể hiện các kết quả mô phỏng thông qua hai kịch bản và so sánh với các bộ điều khiển khác; và cuối cùng là kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai được trình bày trong Phần 5.

Ký hiệu: Xét véc tơ $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$, trong đó x_k ký hiệu các phần tử của véc tơ $\mathbf{x}$, $k = 1, \dots, n$. $\text{diag}(x_k)$ là ma trận đường chéo chính chứa các phần tử của véc tơ $\mathbf{x}$, $\mathbf{x}^{[\beta]} = [x_1^{[\beta]} \ x_2^{[\beta]} \ \dots \ x_n^{[\beta]}]^T$ là lũy thừa của véc tơ $\mathbf{x}$ trong đó $x_k^{[\beta]} = |x_k|^\beta \text{sgn}(x_k)$. $\ln(\bullet)$ là hàm logarit tự nhiên của $\bullet$. $\lambda_{\min}(\bullet)$ là trị riêng nhỏ nhất của ma trận $\bullet$.

2. Mô hình toán học

Theo nghiên cứu [24], mô hình toán học ba bậc tự do của tàu mặt nước được trình bày như sau:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} \\ \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó $\boldsymbol{\eta} = [\eta_x \ \eta_y \ \eta_\phi]^T$ với $(\eta_x, \eta_y, \eta_\phi)$ tương ứng là các chuyển động tịnh tiến dọc, tịnh tiến ngang, và chuyển động quay quanh trục đứng.

$\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$ là véc tơ vận tốc của tàu theo ba chuyển động.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$$
 lần lượt là ma trận quán

tính, ma trận hướng tâm Coriolis, và ma trận giảm chấn, với

$$\begin{aligned} m_{11} &= m - X_{\dot{u}}, \quad m_{22} = m - Y_{\dot{v}}, \quad m_{23} = mX_g - Y_{\dot{r}}, \quad m_{32} \\ &= mX_g - N_{\dot{v}}, \quad m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}, \quad c_{31} = -c_{13} = m_{22}v \\ &+ m_{23}r, \quad c_{23} = -c_{32} = (m - X_{\dot{u}})u, \quad d_{11} = -X_u \\ &- X_{|u|u} |u| - X_{|uuu|} |u|^2, \quad d_{22} = -Y_v - Y_{|v|v} |v| - Y_{|rv|} |r|, \\ &d_{23} = -Y_r - Y_{|v|r} |v| - Y_{|rr|} |r|, \quad d_{32} = -N_v - N_{|v|v} |v| \\ &- N_{|rv|} |r|, \quad d_{33} = -N_r - N_{|v|r} |v| - N_{|rr|} |r|. \end{aligned}$$

Các hệ số $\{X_{(*)}, Y_{(*)}, N_{(*)}\}$ là các tham số thủy động lực học được định nghĩa theo tài liệu [24]. Tín hiệu điều khiển được ký hiệu là $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_\phi]^T$. Ma trận chuyển đổi $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ được xác định như sau:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \eta_\phi & -\sin \eta_\phi & 0 \\ \sin \eta_\phi & \cos \eta_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Trong quá trình điều khiển tàu mặt nước, việc bảo đảm cho hệ thống hoạt động trong phạm vi làm việc xác định trước đóng vai trò thiết yếu nhằm duy trì tính an toàn vận hành, giảm thiểu các nguy cơ mất kiểm soát tiềm ẩn, bảo vệ con người và phương tiện, đặc biệt dưới ảnh hưởng của các điều kiện môi trường khắc nghiệt như sóng, gió và dòng chảy phức tạp. Ngoài ra, mỗi nhiệm vụ vận hành thường gắn liền với những giới hạn hoạt động riêng, đòi hỏi hệ thống phải thích ứng linh hoạt với các ràng buộc thay đổi theo từng giai đoạn hoạt động cụ thể. Do đó, nghiên cứu xem xét việc đảm bảo đầu ra của hệ thống ổn định trong một miền ràng buộc biến thiên theo thời gian $-b_{\eta_i}^L(t) \leq \eta_i(t) \leq b_{\eta_i}^H(t)$ với $i = \{x, y, \phi\}$. Xét $\mathbf{x}_1 = \boldsymbol{\eta}$ và $\mathbf{x}_2 = \dot{\boldsymbol{\eta}}$, (1) được biến đổi lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1) \boldsymbol{\tau} \end{cases} \quad (3)$$

trong đó $\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{M}^{-1}$ và

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} - \mathbf{g}(\mathbf{x}_1) (\mathbf{C}(\mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \mathbf{v}).$$

Phương trình (3) là cơ sở cho thiết kế bộ điều khiển an toàn thời gian hữu hạn được trình bày trong phần tiếp theo.

3. Bộ điều khiển an toàn thời gian hữu hạn

Trong phần này, một bộ điều khiển cuốn chiếu tích hợp hàm Lyapunov rào cản được phát triển nhằm đảm bảo khả năng vận hành an toàn và chính xác cho hệ thống tàu mặt nước tự hành. Sau đó, tính ổn định của hệ thống vòng kín và thời gian hội tụ của các sai lệch bám được phân tích chi tiết thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

Trước hết, đặt $\boldsymbol{\eta}_d = [\eta_{dx} \quad \eta_{dy} \quad \eta_{d\phi}]^T$ là quỹ đạo mong muốn của hệ thống. Miền ràng buộc biến thiên theo thời gian của sai lệch vị trí hệ thống $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \boldsymbol{\eta}_d = [e_{1x} \quad e_{1y} \quad e_{1\phi}]^T$ được lựa chọn như sau
 $|e_{1i}(t)| \leq b_{1i}(t) = \min\{b_{\eta_i}^H - \eta_{di}, -b_{\eta_i}^L - \eta_{di}\}$ với
 $i = \{x, y, \phi\}$. Đạo hàm sai lệch vị trí $\mathbf{e}_1$ và sử dụng (3) ta thu được:

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_2 + \mathbf{x}_{2d} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d, \quad (4)$$

trong đó $\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2d} = [e_{2x} \quad e_{2y} \quad e_{2\phi}]^T$. Xét hàm Lyapunov như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \ln\left(\frac{b_{1i}^2}{\Psi_{1i}}\right), \quad (5)$$

với $\Psi_{1i} = b_{1i}^2 - e_{1i}^2$. Đạo hàm hai vế (5) và kết hợp với (4) ta thu được:

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \left(\frac{e_{1i}}{\Psi_{1i}} (e_{2i} + x_{2di} - \dot{\eta}_{di}) + \frac{\dot{b}_{1i}}{b_{1i}} - \frac{b_{1i}\dot{b}_{1i}}{\Psi_{1i}} \right). \quad (6)$$

Từ đó, tín hiệu điều khiển ảo được đề xuất như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{2d} &= \dot{\boldsymbol{\eta}}_d - \mathbf{k}_1 \mathbf{e}_1 - \mathbf{k}_2 \boldsymbol{\Omega}_1 \mathbf{e}_1^{[\beta]} \\ &\quad - \mathbf{k}_3 \boldsymbol{\Omega}_2 \mathbf{e}_1 - \frac{1}{2} \mathbf{e}_1, \end{aligned} \quad (7)$$

trong đó $\beta \in (0, 1)$, $\boldsymbol{\Omega}_1 = \text{diag}\left(\frac{1}{\Psi_{1i}^{\frac{\beta-1}{2}}}\right)$ và

$$\boldsymbol{\Omega}_2 = \text{diag}\left(\frac{1}{\Psi_{1i}}\right), \quad \mathbf{k}_1 = \text{diag}(k_{1i}),$$

$\mathbf{k}_2 = \text{diag}(k_{2i})$, và $\mathbf{k}_3 = \text{diag}(k_{3i})$ là các tham số điều khiển. Thay (7) vào (6) ta thu được:

$$\dot{V}_1 = \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \left(-\frac{k_{1i} e_{1i}^2}{\Psi_{1i}} - \frac{k_{2i} |e_{1i}|^{\beta+1}}{\Psi_{1i}^{\frac{\beta+1}{2}}} - \frac{k_{3i} e_{1i}^2}{\Psi_{1i}^2} + \frac{e_{1i} e_{2i}}{\Psi_{1i}} - \left(\frac{e_{1i}^2}{2\Psi_{1i}} + \frac{b_{1i}\dot{b}_{1i}}{\Psi_{1i}} \right) + \frac{\dot{b}_{1i}}{b_{1i}} \right). \quad (8)$$

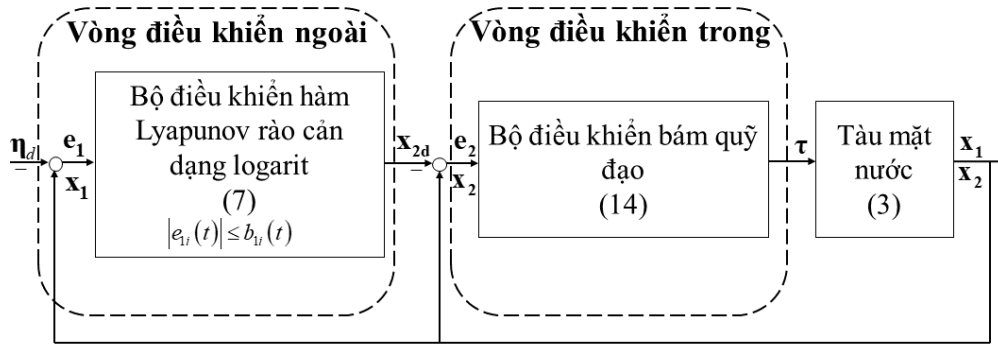
Với hằng số $\varsigma_1 < \Psi_{1i}$ bất kỳ, áp dụng bất đẳng thức Young ta có đánh giá sau:

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{e_{1i}^2}{2\Psi_{1i}} + \frac{b_{1i}\dot{b}_{1i}}{\Psi_{1i}} \right) \\ & \leq \frac{1}{2} + \frac{\varsigma_1}{2} \left(\frac{e_{1i}}{\Psi_{1i}} \right)^2 + \frac{1}{2\varsigma_1^2} \dot{b}_{1i}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Bằng cách kết hợp (8) và (9), đạo hàm của V_1 được đánh giá như sau:

$$\dot{V}_1 \leq \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \left(-\frac{k_{1i} e_{1i}^2}{\Psi_{1i}} - \frac{k_{2i} |e_{1i}|^{\beta+1}}{\Psi_{1i}^{\frac{\beta+1}{2}}} - \left(k_{3i} - \frac{\varsigma_1^2}{2} \right) \left(\frac{e_{1i}}{\Psi_{1i}} \right)^2 + \frac{e_{1i} e_{2i}}{\Psi_{1i}} \right) + \varpi_1, \quad (10)$$

trong đó $\varpi_1 = \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \left(\frac{\dot{b}_{1i}}{b_{1i}} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2\varsigma_1^2} \dot{b}_{1i}^2 \right)$.



Hình 1: Cấu trúc điều khiển phương pháp đề xuất.

Xét đạo hàm sai lệch vòng trong $\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2d}$ và kết hợp với (3) ta thu được:

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1)\boldsymbol{\tau} - \dot{\mathbf{x}}_{2d}. \quad (11)$$

Chọn hàm Lyapunov cho hệ thống vòng kín như sau:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \mathbf{e}_2^T \mathbf{e}_2. \quad (12)$$

Đạo hàm hai vế (12) và sử dụng (11) ta có:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \mathbf{e}_2^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1)\boldsymbol{\tau} - \dot{\mathbf{x}}_{2d}). \quad (13)$$

Dựa trên (10) và (13), tín hiệu điều khiển được đề xuất như sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_1)^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{2d} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ -\boldsymbol{\Omega}_2 \mathbf{e}_1 - \mathbf{k}_4 \mathbf{e}_2 - \mathbf{k}_5 \mathbf{e}_2^{[\beta]} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

với $\mathbf{k}_4 = \text{diag}(k_{4i})$ và $\mathbf{k}_5 = \text{diag}(k_{5i})$ là các tham số điều khiển.

Sơ đồ điều khiển của phương pháp đề xuất được thể hiện trong Hình 1. Sau khi nhận các phản hồi trạng thái của hệ thống, bộ điều khiển ràng buộc dựa trên hàm Lyapunov rào cản (7) được thiết kế để xác định ra tín hiệu điều khiển ảo $\mathbf{x}_{2d}$ dựa trên sai lệch $\mathbf{e}_1$ làm giá trị đặt cho vòng trong. Sau đó, để đảm bảo $\mathbf{x}_2$ tiến tới giá trị đặt $\mathbf{x}_{2d}$, bộ điều khiển bám quỹ đạo (14) tính toán ra tín hiệu điều khiển $\boldsymbol{\tau}$ cho hệ thống tàu mặt nước (3).

Tiếp theo, tính ổn định của hệ thống vòng kín được kiểm chứng sử dụng lý thuyết ổn định

Lyapunov. Bằng cách thay thế (10) và (14) vào (13), ta thu được đánh giá như sau:

$$\dot{V}_2 \leq \sum_{i=\{x,y,\phi\}} \left[-\frac{k_{1i} e_{1i}^2}{\Psi_{1i}} - \frac{k_{2i} |e_{1i}|^{\beta+1}}{\Psi_{1i}^{\frac{\beta+1}{2}}} - \left(k_{3i} - \frac{\zeta_1^2}{2} \right) \left(\frac{e_{1i}}{\Psi_{1i}} \right)^2 - k_{4i} e_{2i}^2 - k_{5i} e_{2i}^{\beta+1} \right] + \varpi_1. \quad (15)$$

Bằng cách lựa chọn tham số điều khiển $\mathbf{k}_3$ thỏa

mãn $k_{3i} > \frac{\zeta_1^2}{2}$ và kết hợp với các đánh giá sau:

$$\begin{cases} \ln \left(\frac{b_{1i}^2}{\Psi_{1i}} \right) \leq \frac{e_{1i}^2}{\Psi_{1i}}, \forall |e_{1i}| < b_{1i} \\ \left(\sum_{i=\{x,y,\phi\}} e_{2i}^2 \right)^{\frac{\beta+1}{2}} \leq \sum_{i=\{x,y,\phi\}} e_{2i}^{\beta+1} \end{cases} \quad (16)$$

Phương trình (15) được viết lại như sau:

$$\dot{V}_2 \leq -\varpi_2 V_2 - \varpi_3 V_2^{\frac{\beta+1}{2}} + \varpi_1, \quad (17)$$

trong đó $\omega_2 = \min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_1), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_4) \}$ và $\omega_3 = \min \{ \lambda_{\min}(\mathbf{k}_2), \lambda_{\min}(\mathbf{k}_5) \}$. Xét hằng số dương l bất kỳ, (17) được viết lại tương đương như sau:

$$\dot{V}_2 \leq -\varpi_2 V_2 - \varpi_3 l V_2^{\frac{\beta+1}{2}} - \left(\varpi_2 (1-l) V_2^{\frac{\beta+1}{2}} - \varpi_1 \right). \quad (18)$$

Nếu $V_2^{\frac{\beta+1}{2}} > \frac{\varpi_1}{\varpi_2(1-l)}$, (18) trở thành:

$$\dot{V}_2 \leq -\varpi_2 V_2 - \varpi_3 l V_2^{\frac{\beta+1}{2}}. \quad (19)$$

Phương trình (19) chứng minh rằng hàm Lyapunov giảm và đưa các sai lệch vào miền hội tụ B được xác định như sau:

$$B \equiv \left\{ \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2 \in \mathbb{R}^3 \left| V_2 \leq \left(\frac{\varpi_1}{\varpi_2(1-l)} \right)^{\frac{2}{\beta+1}} \right. \right\}. \quad (20)$$

Bằng cách giải phương trình (19), thời gian hội tụ T được đưa ra như sau:

$$T \leq \frac{2}{\varpi_2(1-\beta)} \times \ln \left(\frac{\varpi_2 V_2^{\frac{1-\beta}{2}}(t=0) + \varpi_3 l}{\varpi_3 l} \right). \quad (21)$$

Như vậy, các sai lệch bám đạt được tính bị chặn đều cuối cùng dựa theo [25].

Nhận xét 1: Những phân tích lý thuyết cụ thể về miền hội tụ và thời gian ổn định của hệ thống cung cấp các cơ sở cho người vận hành có thể điều chỉnh tham số phù hợp với từng ứng dụng cụ thể. Chẳng hạn, việc lựa chọn $\mathbf{k}_2$ và $\mathbf{k}_5$ để giảm giá trị ω_3 cho phép làm tăng tốc độ hội tụ của hệ thống, thể hiện qua (21). Tương tự, việc lựa chọn các tham số $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$, $\mathbf{k}_3$ cùng với miền ràng buộc b_{1i} giúp điều chỉnh miền hội tụ của hệ thống thông qua tỉ số $\frac{\omega_1}{\omega_2}$

như được chỉ ra trong (20). Như vậy, việc cung cấp cụ thể các phân tích lý thuyết giúp tăng cường tính ứng dụng của phương pháp đề xuất trong thực tế.

4. Kết quả mô phỏng

Trong phần này, các kết quả mô phỏng sẽ được trình bày cụ thể để kiểm chứng tính hiệu quả của phương pháp đề xuất. Nghiên cứu sử dụng mô hình Cybership II [24] với thông số được liệt kê trong Bảng 1. Quỹ đạo đặt được lựa chọn như sau:

$$\boldsymbol{\eta}_d = \begin{bmatrix} -5 + 6 \cos\left(\frac{\pi t}{300}\right) \\ -1 + 6 \sin\left(\frac{\pi t}{300}\right) \\ 0.5 + \frac{\pi t}{300} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Điều kiện ban đầu của hệ thống được cài đặt là $\boldsymbol{\eta}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$. Tham số điều khiển được chọn như trong Bảng 2. Bên cạnh đó, hai kịch bản kiểm chứng được thiết lập như sau:

Kịch bản 1 so sánh thời gian hội tụ của bộ điều khiển đề xuất (FT-OBLF) với bộ điều khiển ràng buộc đầu ra (OBLF) được đề xuất trong [21] trong điều kiện lý tưởng. Miền ràng buộc sai lệch vị trí của cả hai phương pháp được lựa chọn như sau $b_{1x} = b_{1y} = 1.5$, $b_{1\phi} = 0.75$.

Kịch bản 2 được xây dựng trong điều kiện nhiễu phức tạp để làm nổi bật khả năng ràng buộc biến thiên của phương pháp đề xuất, được xác định như sau:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{wind}} + \mathbf{d}_{\text{wave}} + \mathbf{d}_u, \quad (23)$$

Bảng 1: Thông số mô hình tàu.

Thông số	m	I_z	x_g
Giá trị	23.8	1.76	0.046
Thông số	X_u	$X_{ u u}$	X_{uuu}
Giá trị	-0.7725	-1.3274	-5.8664
Thông số	Y_v	$Y_{ v v}$	Y_r
Giá trị	-0.8612	-36.3823	0.1079
Thông số	N_v	$N_{ v v}$	$X_{\dot{u}}$
Giá trị	0.1052	5.0437	-2.0
Thông số	$Y_{\dot{v}}$	$Y_{\dot{r}}$	$N_{\dot{v}}$
Giá trị	-10.0	-0.0	-0.0
Thông số	$N_{\dot{r}}$		
Giá trị	-1.0		

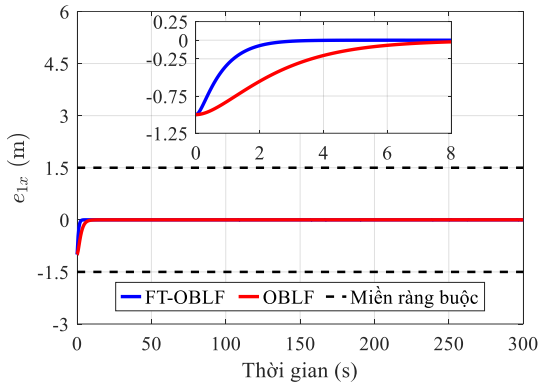
Bảng 2: Tham số điều khiển.

Tham số	$\mathbf{k}_1$	$\mathbf{k}_2$	$\mathbf{k}_3$	$\mathbf{k}_4$	$\mathbf{k}_5$	β
Giá trị	$5\mathbf{I}_3$	$3\mathbf{I}_3$	$\mathbf{I}_3$	$5\mathbf{I}_3$	$5\mathbf{I}_3$	0.5

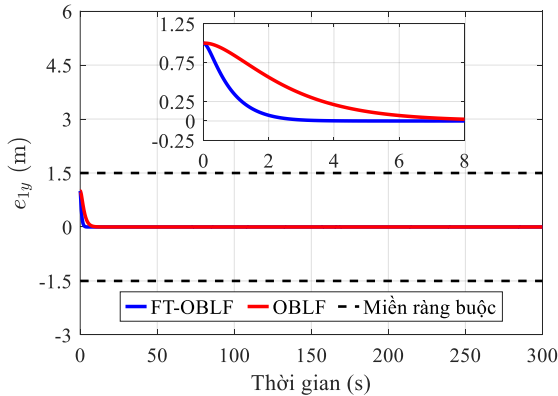
với $\mathbf{d}_{\text{wind}} = k_d v_{\text{wind}}^2 \mathbf{k}_h \mathbf{k}_c \mathbf{A}_s$ là nhiễu gió trong đó $k_d = 1.25 \text{ kg/m}^3$ là mật độ không khí, $\mathbf{k}_h = \text{diag}(1.12, 1, 0.1)$, $\mathbf{k}_c = \text{diag}(1.2, 1.1, 0.095)$ lần lượt là hệ số biến thiên tốc độ gió và hệ số cản, $\mathbf{A}_s = [0.85 \quad 0.32 \quad 0.15]^T$ là diện tích bề mặt tối đa, $v_{\text{wind}} = 3 \text{ m/s}$ là vận tốc gió. Nhiễu sóng được xem xét là

$$\mathbf{d}_{\text{wave}} = \begin{bmatrix} 3v_x^3 + 5\sin(v_x v_y) + 8\sin(0.7t) \\ 7.4v_x^2 + 2.9\sin(v_y) - 4\sin(0.4t) \\ -4v_\phi^3 - 5\sin(0.7t) + 3\cos(0.08t) \end{bmatrix}.$$

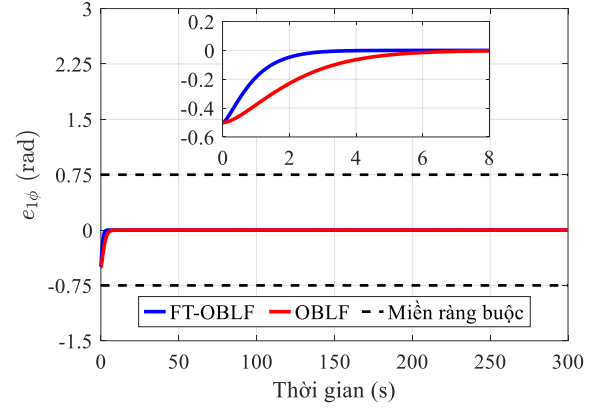
$\mathbf{d}_u = 0.25(\mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v})$ là bất định mô hình. Trong kịch bản này, bộ điều khiển đề xuất được so sánh thêm với bộ điều khiển cuốn chiếu (Backstepping) đề xuất trong [9] bên cạnh so sánh với bộ điều khiển OBLF trong [21]. Trong khi ràng buộc của bộ điều khiển OBLF được giữ nguyên như Kịch bản 1 do chỉ xem xét các ràng buộc cố định, các ràng buộc sai lệch vị trí của bộ điều khiển đề xuất trong Kịch bản 2 được lựa chọn như sau: $b_{1x} = b_{1y} = (1.5 - 0.2)e^{-0.8t} + 0.2$, $b_{1\phi} = (0.75 - 0.1)e^{-0.8t} + 0.1$.



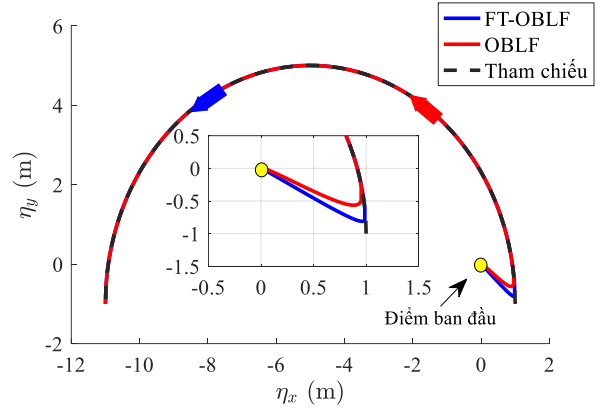
Hình 2a: (Kịch bản 1) Sai lệch chuyển động tịnh tiến dọc.



Hình 2b: (Kịch bản 1) Sai lệch chuyển động tịnh tiến ngang.



Hình 2c: (Kịch bản 1) Sai lệch chuyển động quay theo trục đứng.



Hình 2d: (Kịch bản 1) Đáp ứng quỹ đạo hệ thống.

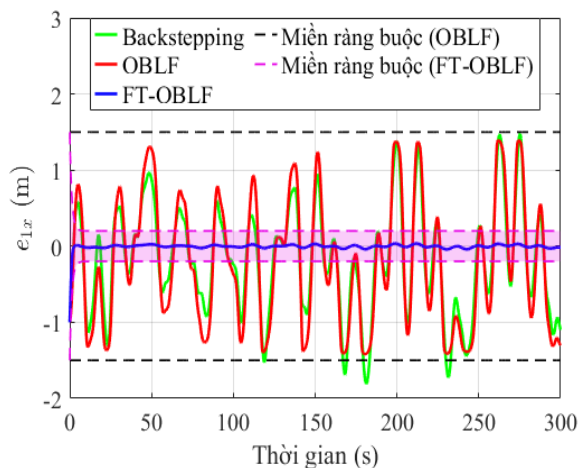
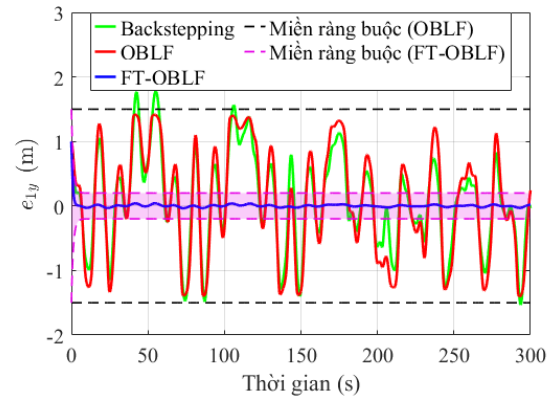
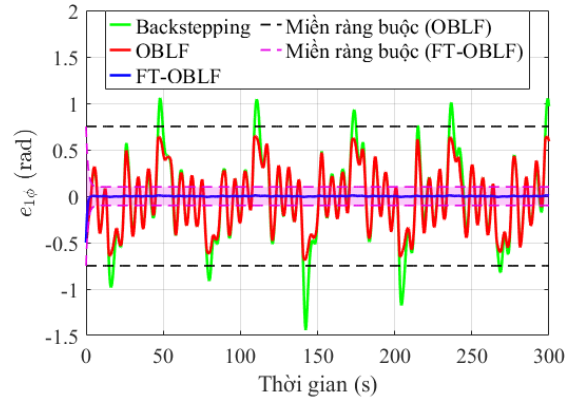
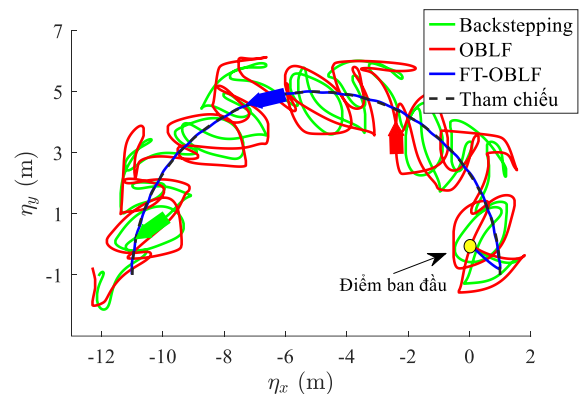
Hình 2a – 2d thể hiện kết quả mô phỏng trong Kịch bản 1, trong đó bộ điều khiển đề xuất (FT-OBLF) cho thấy khả năng hội tụ nhanh chóng so với phương pháp OBLF đề xuất trong [21]. Cụ thể, bộ điều khiển đảm bảo các sai lệch vị trí ($e_{1x}, e_{1y}, e_{1\phi}$) hội tụ về 0 trong khoảng 3 giây, trong khi đó thời gian hội tụ sử dụng bộ điều khiển OBLF là khoảng 7 giây, như được mô tả trong Hình 2a – 2c. Nhờ tích hợp thêm thành phần bậc phân số $(\mathbf{k}_2 \Omega_1 \mathbf{e}_1^{[\beta]})$ trong (7) và $(\mathbf{k}_3 \mathbf{e}_2^{[\beta]})$ trong (14), cách tiếp cận của chúng tôi cho phép cải thiện tốc độ hội tụ khi vị trí hệ thống tiến gần giá trị mong muốn. Hơn nữa, bằng cách xem xét rõ ràng thời gian hội tụ của hệ thống, thể hiện qua phương trình (21), bộ điều khiển đề xuất cung cấp thông tin cho việc điều chỉnh các tham số điều khiển sao cho phù hợp với từng yêu cầu cụ thể trong các ứng dụng thực tế. Đáp ứng quỹ đạo hệ thống sử dụng hai bộ điều khiển được thể hiện trong Hình 2d, một lần nữa thể hiện khả năng tăng cường tốc độ hội tụ của phương pháp đề xuất so với bộ điều khiển OBLF trong [21]. Ngoài ra, các phân tích định lượng như

Bảng 3: Chỉ số đánh giá trong Kịch bản 1, trong đó “x” thể hiện chỉ tiêu không được xét đến.

	RMS	Thời gian hội tụ mô phỏng	Thời gian hội tụ lý thuyết
OBLF	0.011	7.8s	x
FT-OBLF	0.006	2.3s	3.18s

đánh giá khả năng hội tụ thông qua chỉ số Root Mean Square (RMS) cũng như so sánh thời gian hội tụ mô phỏng với phân tích lý thuyết trong (21) được cung cấp trong Bảng 3. Cụ thể, phương pháp đề xuất (FT-OBLF) đạt được chỉ số RMS nhỏ hơn so với phương pháp OBLF và đảm bảo thời gian hội tụ nhỏ hơn 3.18 s dựa trên (21), yếu tố chưa được phân tích trong phương pháp OBLF. Những kết quả trên đã xác thực tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Kết quả mô phỏng trong Kịch bản 2 được chỉ ra trong các Hình 3a – 3d, cho thấy hiệu suất vượt trội của phương pháp đề xuất so với bộ điều khiển Backstepping trong [9] và bộ điều khiển OBLF trong [21] dưới ảnh hưởng của nhiễu và bất định. Cụ thể, Hình 3a – 3c thể hiện các sai lệch vị trí của hệ thống, cho thấy bộ điều khiển đề xuất luôn đảm bảo các sai lệch ở mức tối thiểu và duy trì chúng trong miền ràng buộc chặt chẽ. Trong khi đó, do không xem xét các ràng buộc hệ thống hay xử lý các ảnh hưởng của nhiễu, bộ điều khiển Backstepping trong [9] không thể đảm bảo hệ thống vận hành chính xác trong điều kiện khắc nghiệt. Bên cạnh đó, bộ điều khiển OBLF trong [21] chỉ tích hợp các ràng buộc hằng số, do đó miền ràng buộc phải được mở rộng để thỏa mãn điều kiện ban đầu của hệ thống. Điều này dẫn đến sự suy giảm hiệu suất

**Hình 3a:** (Kịch bản 2) Sai lệch chuyển động tịnh tiến dọc.**Hình 3b:** (Kịch bản 2) Sai lệch chuyển động tịnh tiến ngang.**Hình 3c:** (Kịch bản 2) Sai lệch chuyển động quay theo trục đứng.**Hình 3d:** (Kịch bản 1) Đáp ứng quỹ đạo hệ thống.

vận hành của hệ thống trong điều kiện nhiễu ngoài và bất định do không thể ràng buộc chặt chẽ các sai lệch vị trí, được chỉ ra trong Hình 3a – 3c. Ngược lại, do xem xét ràng buộc biến thiên theo thời gian, phương pháp đề xuất chứng minh độ hiệu quả trong việc duy trì các sai lệch vị trí của hệ thống ổn định trong miền ràng buộc chặt chẽ xác định trước, đảm bảo đáp ứng quỹ đạo theo giá trị mong muốn như được chứng minh trong Hình 3d. Tương tự Kịch bản 1, các chỉ số đánh giá trong Kịch bản 2 cho thấy độ hiệu quả của phương pháp đề xuất so với bộ điều khiển Backstepping và OBLF. Cụ thể, bộ điều khiển FT-OBLF vẫn đạt được hiệu suất điều khiển tốt nhất khi

Bảng 4: Chỉ số đánh giá trong Kịch bản 2, trong đó “x” thể hiện chỉ tiêu không được xét đến

	RMS	Thời gian hội tụ mô phỏng	Thời gian hội tụ lý thuyết
OBLF	0.1351	x	x
Backstepping	0.1562	x	x
FT-OBLF	0.012	2.6 s	3.18 s

đạt chỉ số RMS thấp hơn phương pháp Backstepping và OBLF, mặc dù chỉ số này lớn hơn Kịch bản 1 do chịu ảnh hưởng của nhiễu tác động. Bên cạnh đó, phương pháp đề xuất đạt thời gian hội tụ hữu hạn nhỏ hơn phân tích lý thuyết trong (21), trong khi khía cạnh này không được xem xét trong cả hai phương pháp Backstepping và OBLF. Qua đó, tính đúng đắn và hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm chứng.

5. Kết luận

Trong nội dung nghiên cứu này, phương pháp điều khiển an toàn thời gian hữu hạn được phát triển cho hệ thống tàu mặt nước tự hành giúp đảm bảo hệ thống vận hành an toàn và chính xác trong điều kiện khắc nghiệt của môi trường. Bằng cách sử dụng hàm Lyapunov rào cản và kỹ thuật cuốn chiếu kết hợp với các thành phần bậc phân số, bộ điều khiển đề xuất đảm bảo đồng thời việc duy trì sai lệch hệ thống trong một giới hạn chặt chẽ và đảm bảo hội tụ trong khoảng thời gian hữu hạn. Tính ổn định và thời gian hội tụ của hệ thống được phân tích cụ thể dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Trong tương lai, các cơ chế ước lượng/thích nghi nhiễu được phát triển nhằm giải quyết hiệu quả ảnh hưởng của các yếu tố bất lợi tác động lên hệ thống, giúp nâng cao hiệu suất vận hành và tăng cường tính khả thi trong các ứng dụng thực tế.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Cao Văn Bính: Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Điều tra, Xác thực, Trực quan hóa, Tiếp nhận tài trợ, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết – bản thảo gốc. **Đàm Văn Tùng:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Điều tra, Xác thực, Viết – bản thảo gốc. **Phạm Văn Triệu:** Phương pháp, Giám sát, Tiếp nhận tài trợ, chỉnh sửa bản thảo.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.25.

1st Cao Van Binh*. *Vietnam Maritime University.*
2nd Dam Van Tung. *Vietnam Maritime University.*
3rd Pham Van Trieu. *Vietnam Maritime University*
*Corresponding author:
caovanbinh@vimaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

[1] H. R. Karimi and Y. Lu, “Guidance and control methodologies for marine vehicles: A survey,” *Control Engineering Practice*, vol. 111, p. 104785, 2021.

[2] R. Kotian, P. Umesh, and K. V. Gangadharan, “Real-time implementation of PID control for unmanned surface vessel: A practical approach,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Jul. 2023, pp. 1–6.

[3] R. Yazdanpanah, M. J. Mahjoob, and E. Abbasi, “Fuzzy LQR controller for heading control of an unmanned surface vessel,” in *Proc. Int. Conf. Electrical and Electronics Engineering*, Apr. 2013, pp. 73–78.

[4] P. Rasouli, K. Shojaei, and A. Chatraei, “Output feedback look-ahead position control of electrically driven fast surface vessels,” *Automatika*, vol. 57, no. 4, pp. 968–981, 2016.

[5] K. Nguyen, V. T. Dang, D. D. Pham, and P. N. Dao, “Formation control scheme with reinforcement learning strategy for a group of multiple surface vehicles,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 34, no. 3, pp. 2252–2279, 2024.

[6] V. T. Vu, Q. H. Tran, T. L. Pham, and P. N. Dao, “Online actor–critic reinforcement learning control for uncertain surface vessel systems with external disturbances,” *Int. J. Control, Automation and Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1029–1040, 2022.

[7] Y. Zheng, Z. Liu, and L. Liu, “Robust MPC-based fault-tolerant control for trajectory tracking of surface vessel,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 14755–14763, 2018.

[8] H. Zheng, R. R. Negenborn, and G. Lodewijks, “Trajectory tracking of autonomous vessels

- using model predictive control,” in IFAC Proc. Volumes, vol. 47, no. 3, 2014, pp. 8812–8818.
- [9] M. Breivik and T. I. Fossen, “Path following for marine surface vessels,” in Proc. OCEANS 2004 MTS/IEEE Techno-Ocean, vol. 4, Nov. 2004, pp. 2282–2289.
- [10] L. M. Kinjo, T. Ménard, S. Wirtensohn, O. Gehan, and J. Reuter, “Tracking control of docking maneuvers for a fully actuated surface vessel using backstepping,” IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 32, no. 5, pp. 1920–1927, 2024.
- [11] J. Ghommam, F. Mnif, and K. Metwally, “Backstepping technique for tracking control of an underactuated surface vessel with unmeasured thruster dynamic,” in IFAC Proc. Volumes, vol. 41, no. 2, 2008, pp. 2324–2329.
- [12] G. Xia, X. Shao, and A. Zhao, “Robust nonlinear observer and observer-backstepping control design for surface ships,” Asian J. Control, vol. 17, no. 4, pp. 1377–1393, 2015.
- [13] S. Yin and B. Xiao, “Tracking control of surface ships with disturbance and uncertainties rejection capability,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 22, no. 3, pp. 1154–1162, 2016.
- [14] C. Mu, X. Wei, H. Zhang, X. Hu, and J. Han, “Disturbance observer-based backstepping control for leader-follower ships with disturbances,” Ships and Offshore Structures, vol. 19, no. 4, pp. 532–540, 2024.
- [15] O. Elhaki and K. Shojaei, “Robust saturated dynamic surface controller design for underactuated fast surface vessels including actuator dynamics,” Ocean Engineering, vol. 229, p. 108987, 2021.
- [16] J. Zeng, L. Wan, Y. Li, Z. Zhang, Y. Xu, and G. Li, “Robust composite neural dynamic surface control for the path following of unmanned marine surface vessels with unknown disturbances,” Int. J. Advanced Robotic Systems, vol. 15, no. 4, 2018.
- [17] C. Van Binh, D. V. Thang, T. T. D. Trinh, D. Van Trong, and P. Van Trieu, “A state observer-based robust control approach for surface vessel using fractional-order calculus and neural network,” in Proc. Int. Conf. Advanced Technologies for Communications (ATC), Oct. 2024, pp. 951–956.
- [18] M. Van, “Adaptive neural integral sliding-mode control for tracking control of fully actuated uncertain surface vessels,” Int. J. Robust Nonlinear Control, vol. 29, no. 5, pp. 1537–1557, 2019.
- [19] M. Movahhed, S. Dadashi, and M. Danesh, “Adaptive sliding mode control for autonomous surface vessel,” in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics, Apr. 2011, pp. 522–527.
- [20] D. S. Cao and Q. V. Tran, “Adaptive path-following control of underactuated surface vessels subject to unknown disturbances with uniform bounded lateral motion,” Int. J. Control, Automation and Systems, pp. 1–11, 2025.
- [21] Q. Gao and J. Li, “A switching event-triggered control method for course tracking of surface vessels with output constraints and unknown control direction,” AIMS Math., vol. 10, no. 11, pp. 27171–27190, 2025.
- [22] W. He, Y. Chen, and Z. Yin, “Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints,” IEEE Trans. Cybernetics, vol. 46, no. 3, pp. 620–629, 2015.
- [23] K. P. Tee, S. S. Ge, and E. H. Tay, “Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems,” Automatica, vol. 45, no. 4, pp. 918–927, 2009.
- [24] R. Skjetne, T. I. Fossen, and P. V. Kokotović, “Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory,” Automatica, vol. 41, no. 2, pp. 289–298, 2005.
- [25] F. W. Lewis, S. Jagannathan, and A. Yesildirak, Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020.