

ĐIỀU KHIỂN RÀNG BUỘC ĐẦU RA BỀN VỮNG CHO TÀU MẶT NƯỚC DƯỚI BẤT ĐỊNH VÀ NHIỀU THAY ĐỔI THEO THỜI GIAN

ROBUST OUTPUT-CONSTRAINED CONTROL FOR SURFACE VESSELS UNDER TIME-VARYING DISTURBANCES AND UNCERTAINTIES

CAO VĂN BÌNH*, ĐÀM VĂN TÙNG, PHẠM VĂN TRIỆU

Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: caovanbinh@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.789>

Tóm tắt

Ngày nay, sự phát triển nhanh chóng của các hệ thống tàu mặt nước tự hành đã đặt ra yêu cầu cấp thiết về nghiên cứu các phương pháp điều khiển bảo đảm an toàn và độ chính xác trong môi trường biển phức tạp. Trong bài báo này, một thuật toán điều khiển bền vững ràng buộc không gian làm việc cho các hệ thống tàu nổi mặt nước được phát triển với mục tiêu đồng thời giảm thiểu sai lệch bám quỹ đạo và duy trì miền vận hành an toàn trước ảnh hưởng của bất định và nhiễu loạn. Đầu tiên, bộ điều khiển đề xuất được thiết kế bằng cách kết hợp giữa điều khiển bề mặt động và hàm rào chắn Lyapunov nhằm đảm bảo hệ thống ổn định trong vùng làm việc xác định trước. Sau đó, tính ổn định của phương pháp đề xuất được phân tích chặt chẽ sử dụng lý thuyết ổn định Lyapunov. Cuối cùng, các kịch bản mô phỏng số được xây dựng nhằm đánh giá tính hiệu quả của phương pháp đề xuất thông qua so sánh với các phương pháp hiện có.

Từ khóa: Điều khiển bền vững, điều khiển ràng buộc, ổn định Lyapunov, tàu mặt nước.

Abstract

In recent years, the rapid development of autonomous surface vessels has raised urgent requirements for the research of control methods to ensure safety and accuracy in complex marine environments. In this paper, a robust workspace-constrained control algorithm is developed for surface vessels, aiming to simultaneously minimize trajectory tracking errors and maintain within operating regions in the presence of uncertainties and external disturbances. Firstly, the proposed controller is designed by integrating dynamic surface control with barrier Lyapunov function, thereby guaranteeing system stability within a predefined workspace. Subsequently, the

stability of the proposed approach is rigorously analyzed using Lyapunov stability theory. Finally, numerical simulation scenarios are constructed to evaluate the effectiveness of the proposed method through comparison with existing methods.

Keywords: Robust control, constrained control, Lyapunov stability, surface vessels.

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, bài toán thiết kế điều khiển cho tàu mặt nước tự hành đã nhận được sự quan tâm sâu rộng từ cộng đồng các nhà khoa học tại Việt Nam cũng như trên toàn thế giới nhờ vào những ứng dụng tiềm năng trong lĩnh vực vận tải biển, quân sự, bảo vệ chủ quyền và khảo sát đại dương [1]. Tuy nhiên, các yếu tố cố hữu tồn tại của hệ thống, bao gồm đặc tính phi tuyến và bất định mô hình đã đặt ra những thách thức lớn trong việc đảm bảo hiệu suất vận hành. Bên cạnh đó, các tác động phức tạp đến từ môi trường, bao gồm gió, sóng và dòng chảy đại dương, càng làm tăng thêm những thách thức trong việc thiết kế điều khiển. Đặc biệt, việc xem xét các ràng buộc hệ thống trong thiết kế điều khiển cũng là một yếu tố then chốt nhằm tăng tính khả thi của các phương pháp điều khiển trong bối cảnh thực tiễn khi tàu mặt nước phải vận hành trong những giới hạn an toàn nghiêm ngặt nhằm giảm thiểu rủi ro về tài sản và con người.

Một trong những hướng tiếp cận được ứng dụng rộng rãi cho tàu mặt nước tự hành là điều khiển tuyến tính nhờ ưu điểm về cấu trúc đơn giản và dễ dàng triển khai, tiêu biểu như bộ điều khiển tỷ lệ - tích phân - vi phân (PID) trong [2], [3], bộ điều khiển tuyến tính dạng toàn phương trong [4], hay bộ điều khiển phản hồi tuyến tính trong [5]. Tuy nhiên, quá trình tuyến tính hóa mô hình nhằm mục đích thiết kế điều khiển thường làm mất đi các đặc tính phi tuyến quan trọng của hệ thống, từ đó dẫn đến sự suy giảm đáng kể về khả năng bám quỹ đạo trong điều kiện vận hành thực tế. Bên cạnh đó, các phương pháp điều khiển tối ưu cũng được ứng dụng nhằm nâng cao chất lượng vận

hành của tàu mặt nước, trong đó nổi bật là học tăng cường trong [6] và điều khiển dự báo mô hình (MPC) trong [7], [8]. Mặc dù các phương pháp này cho thấy các kết quả hứa hẹn, song hạn chế lớn nhất của chúng nằm ở sự phức tạp về cấu trúc điều khiển và gánh nặng tính toán lớn, qua đó làm giảm tính khả thi khi triển khai trong các ứng dụng thực tiễn. Ngoài ra, lớp điều khiển phi tuyến được nghiên cứu phổ biến do phù hợp với đặc tính phi tuyến của tàu mặt nước [9] - [19]. Cụ thể, các nghiên cứu [9], [10] đã ứng dụng kỹ thuật cuốn chiếu để thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho tàu mặt nước tự hành. Hơn nữa, nghiên cứu [11] đã tích hợp bộ quan sát nhiễu vào cấu trúc điều khiển nhằm nâng cao hiệu quả vận hành trong môi trường chịu tác động của nhiễu và bất định. Tuy nhiên, một thách thức nổi bật của kỹ thuật cuốn chiếu là hiện tượng nhảy cảm với đạo hàm của tín hiệu điều khiển ảo vẫn chưa được xử lý trong các công trình trên. Nhằm khắc phục hạn chế này, các bộ điều khiển bề mặt động trong đó sử dụng bộ lọc thông thấp để làm giảm thiểu hiện tượng trên được phát triển trong các nghiên cứu [12] - [14]. Một hướng tiếp cận khác dựa trên điều khiển trượt đã được đề xuất trong các nghiên cứu [15] và [16], cho phép đảm bảo tính ổn định của hệ thống trước ảnh hưởng của nhiễu và bất định. Bên cạnh đó, nghiên cứu [17] đã phát triển bộ điều khiển trượt bậc phân số tích hợp bộ quan sát trạng thái dựa trên mạng nơ-ron, giúp duy trì hiệu suất điều khiển đồng thời giảm sự phụ thuộc vào các thiết bị đo lường. Ngoài ra, các bộ điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát nhiễu đã được đề xuất trong [18], [19] nhằm tăng cường khả năng bền vững của hệ thống. Dù đạt được các kết quả ấn tượng, các nghiên cứu trên đã bỏ qua việc xem xét duy trì hệ thống trong miền làm việc để đảm bảo an toàn. Để xử lý khoảng trống nghiên cứu trên, bộ điều khiển ràng buộc không gian làm việc được nghiên cứu và phát triển cho hệ phi tuyến trong [20], tuy nhiên vẫn còn tồn tại một số hạn chế như chỉ xem xét ràng buộc đối xứng hay thiếu tính bền vững với ảnh hưởng của nhiễu loạn và bất định.

Thúc đẩy từ phân tích trên, một bộ điều khiển bền vững ràng buộc không gian làm việc được đề xuất cho tàu mặt nước nhằm đảm bảo đồng thời độ chính xác và an toàn của hệ thống trong điều kiện tồn tại nhiễu và bất định. Bên cạnh đó, tính ổn định của hệ thống được phân tích thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov. Bố cục của bài báo được trình bày như sau: Phần 2 giới thiệu mô hình động lực học của tàu mặt nước và các vấn đề cần giải quyết; Phần 3 thiết kế bộ điều khiển và phân tích tính ổn định của hệ thống; trong Phần 4, hai kịch bản mô phỏng được xây dựng và đánh

giá kết quả; Phần 5 là kết luận chung và trình bày hướng nghiên cứu trong tương lai.

Ký hiệu: $\text{diag}(x_k)$ và $\text{col}(x_k)$ với $k=1, \dots, n$ lần lượt là ma trận đường chéo chính và véc tơ cột chứa các phần tử $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. $\ln(*)$ là hàm logarit tự nhiên của $*$. $\lambda_{\min}(\bullet)$ và $\lambda_{\max}(\bullet)$ lần lượt là trị riêng nhỏ nhất và lớn nhất của ma trận $\bullet$.

2. Đặt vấn đề

Xét mô hình động lực học của tàu mặt nước, bao gồm các chuyển động tịnh tiến dọc (η_x), tịnh tiến ngang (η_y), và quay quanh trục đứng (η_ϕ), trong điều kiện có bất định hệ thống và nhiễu loạn môi trường như sau:

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

Trong đó $\boldsymbol{\eta} = [\eta_x \ \eta_y \ \eta_\phi]^T$, $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_\phi]^T$ lần lượt là vị trí và vận tốc của tàu. $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}(\mathbf{v})$, $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ tương ứng là ma trận quán tính, ma trận hướng tâm Coriolis, và ma trận giảm chấn danh định. $\tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{v})$, $\tilde{\mathbf{D}}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là bất định hệ thống so sai lệch giữa mô hình toán học và thực tế. $\boldsymbol{\tau} = [\tau_x \ \tau_y \ \tau_\phi]^T \in \mathbb{R}^3$ là tín hiệu điều khiển gồm lực đẩy theo phương dọc τ_x , lực đẩy bên τ_y , và mô-men quay quanh trục đứng τ_ϕ ; $\boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^3$ là nhiễu loạn môi trường tác động lên hệ thống. Ma trận chuyển đổi $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ được định nghĩa như sau:

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

Mặc dù trên lý thuyết đáp ứng vị trí của tàu mặt nước không bị ràng buộc, nhưng trong thực tế việc duy trì hệ thống trong miền làm việc xác định trước là yêu cầu thiết yếu nhằm đảm bảo tính ổn định, hạn chế rủi ro tiềm ẩn và bảo vệ an toàn con người cũng như tài sản, đặc biệt trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt chịu tác động của sóng, gió, và dòng chảy. Hơn nữa, ở mỗi giai đoạn vận hành khác nhau, hệ thống sẽ phải tuân thủ các miền làm việc an toàn tương ứng để phù hợp với từng ứng dụng. Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này xem xét các ràng buộc đầu ra bất đối xứng và biến thiên theo thời gian của tàu mặt nước nhằm duy trì hệ thống trong một vùng giới hạn vận hành an toàn $-k_{\eta_i}^L(t) \leq \eta_i(t) \leq k_{\eta_i}^H(t)$, với $\eta_i = \{\eta_x, \eta_y, \eta_\phi\}$. Xét bất định và nhiễu loạn hệ thống $\mathbf{d}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}, t) = \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} - \tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \tilde{\mathbf{D}}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ và đặt $\mathbf{x}_1 = \boldsymbol{\eta}$ và

$\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}}$, phương trình (1) được biến đổi như sau:

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

với

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{Y} - \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}),$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}^{-1}, \boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}^{-1}\mathbf{d}(\mathbf{q}, \mathbf{v}, t).$$

3. Phương pháp điều khiển

Trong phần này, bộ điều khiển ràng buộc bền vững được đề xuất đảm bảo vận hành chính xác và an toàn cho các hệ thống tàu mặt nước dưới ảnh hưởng của nhiễu và bất định. Sau đó, tính ổn định của phương pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

3.1. Bộ điều khiển ràng buộc bền vững

Khác với cách tiếp cận dựa trên điều khiển hướng, nghiên cứu hiện tại thiết kế bộ điều khiển trực tiếp cho các đầu ra của hệ thống nâng cao khả năng bám quỹ đạo chính xác và cho phép xem xét cụ thể các ràng buộc đầu ra và ràng buộc sai lệch hệ thống. Cụ thể, xét sai lệch vị trí của hệ thống $\mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{q}_d$ với $\mathbf{q}_d = [\eta_{dx} \ \eta_{dy} \ \eta_{d\phi}]^T$ là quỹ đạo đặt, ta có miền ràng buộc của sai lệch vị trí $(-k_{li}^L, k_{li}^H)$ được lựa chọn dựa trên miền ràng buộc đầu ra của hệ thống và giá trị đặt như sau:

$$-k_{\eta}^L - \eta_{di} \leq -k_{li}^L \leq e_{li} \leq \frac{k_{li}^H}{k_{li}^L + e_{li}} - \eta_{di}.$$

Đặt $z_{li} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{k_{li}^H + e_{li}}{k_{li}^L - e_{li}} \right)$, lấy đạo hàm và kết hợp với (3) ta thu được:

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \boldsymbol{\Theta}_1 + \boldsymbol{\Theta}_2(\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{q}}_d), \quad (4)$$

Trong đó $\boldsymbol{\Theta}_2^L = \frac{1}{2} \text{diag} \left(\frac{k_{li}^H + k_{li}^L}{k_{li}^L + e_{li}} \right)$ và $\boldsymbol{\Theta}_1 = -\frac{1}{2} \text{col} \left(-\frac{k_{li}^L}{k_{li}^H + e_{li}}, \frac{k_{li}^H}{k_{li}^L - e_{li}} \right) \cdot e_{li}$. Từ đó, tín hiệu điều khiển ảo được đề xuất như sau:

$$\mathbf{x}_{2\alpha} = \dot{\mathbf{q}}_d - \boldsymbol{\Theta}_2^{-1}(\boldsymbol{\rho}_1 \mathbf{z}_1 + \boldsymbol{\Theta}_1), \quad (5)$$

với $\boldsymbol{\rho}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là tham số điều khiển.

Để giải quyết hiện tượng nhảy cảm với đạo hàm của tín hiệu ảo, một bộ lọc thông thấp được đề xuất như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{2d}(0) = \mathbf{x}_{2\alpha}(0) \\ \dot{\mathbf{x}}_{2d} = \boldsymbol{\zeta}_1(\mathbf{x}_{2\alpha} - \mathbf{x}_{2d}) \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó $\boldsymbol{\zeta}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là tham số của bộ lọc.

Dựa trên đầu ra của bộ lọc, sai lệch vòng trong được định nghĩa như sau: $\mathbf{e}_2 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2d}$. Lấy đạo hàm và kết hợp với (3) ta có:

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1)\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) - \dot{\mathbf{x}}_{2d}. \quad (7)$$

Dựa vào (7), tín hiệu điều khiển được đề xuất như

sau:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{g}^{-1}(\mathbf{x}_1) \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{2d} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ -\boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{e}_2 - \boldsymbol{\rho}_3 \text{sgn}(\mathbf{e}_2) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

trong đó $\boldsymbol{\rho}_2, \boldsymbol{\rho}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là các tham số điều khiển. Như vậy có thể thấy qua (8), tín hiệu điều khiển được thiết kế dựa theo các thành phần danh định của hệ $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ và $\mathbf{g}(\mathbf{x}_1)$ thông có thể được xác định chính xác. Trong khi đó, thành phần không dừng $\boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t)$ trong (7) thể hiện ảnh hưởng của bất định và hệ thống không được sử dụng trực tiếp mà được giảm thiểu ảnh hưởng thông qua thành phần $\boldsymbol{\rho}_3 \text{sgn}(\mathbf{e}_2)$ trong (8), được mô tả chi tiết trong phần tiếp theo.

3.2. Phân tích ổn định

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{z}_1^T \mathbf{z}_1 + \frac{1}{2} \mathbf{e}_f^T \mathbf{e}_f + \frac{1}{2} \mathbf{e}_2^T \mathbf{e}_2, \quad (9)$$

với $\mathbf{e}_f = \mathbf{x}_{2d} - \mathbf{x}_{2\alpha}$ là sai lệch của bộ lọc. Đạo hàm hai vế (9) ta thu được:

$$\dot{V} = \mathbf{z}_1^T \dot{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{e}_f^T \dot{\mathbf{e}}_f + \mathbf{e}_2^T \dot{\mathbf{e}}_2. \quad (10)$$

Xét đạo hàm của sai lệch bộ lọc và kết hợp với (6) ta có:

$$\dot{\mathbf{e}}_f = -\boldsymbol{\zeta}_1 \mathbf{e}_f - \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha}. \quad (11)$$

Thay (4), (7), và (11) vào (10) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \mathbf{z}_1^T (\boldsymbol{\Theta}_1 + \boldsymbol{\Theta}_2(\mathbf{x}_2 - \dot{\mathbf{q}}_d)) \\ & + \mathbf{e}_f^T (-\boldsymbol{\zeta}_1 \mathbf{e}_f - \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha}) \\ & + \mathbf{e}_2^T \left(\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) + \mathbf{g}(\mathbf{x}_1)\boldsymbol{\tau} \right. \\ & \left. + \boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) - \dot{\mathbf{x}}_{2d} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Sử dụng tín hiệu điều khiển ảo (5) và tín hiệu điều khiển (8), (12) được biến đổi lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\mathbf{z}_1^T \boldsymbol{\rho}_1 \mathbf{z}_1 - \mathbf{e}_f^T \boldsymbol{\zeta}_1 \mathbf{e}_f - \mathbf{e}_f^T \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha} \\ & + \mathbf{e}_2^T (\boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t) - \boldsymbol{\rho}_2 \mathbf{e}_2 - \boldsymbol{\rho}_3 \text{sgn}(\mathbf{e}_2)). \end{aligned} \quad (13)$$

Từ đó, ta có đánh giá:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\lambda_{\min}(\boldsymbol{\rho}_1) \|\mathbf{z}_1\|^2 - \lambda_{\min}(\boldsymbol{\zeta}_1) \|\mathbf{e}_f\|^2 \\ & + \mathbf{e}_f^T \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha} - \lambda_{\min}(\boldsymbol{\rho}_2) \|\mathbf{e}_2\|^2 \\ & - (\lambda_{\min}(\boldsymbol{\rho}_3) - \|\boldsymbol{\Delta}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t)\|) \|\mathbf{e}_2\|. \end{aligned} \quad (14)$$

Áp dụng bất đẳng thức Young cho thành phần $\mathbf{e}_f^T \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha}$ trong (14) ta có:

$$\mathbf{e}_f \dot{\mathbf{x}}_{2\alpha} \leq \frac{1}{2} (\|\mathbf{e}_f\|^2 + \|\dot{\mathbf{x}}_{2\alpha}\|^2). \quad (15)$$

Với giả thiết tồn tại hằng số $b_{x_{2\alpha}}, b_\Delta$ sao cho $\|\dot{\mathbf{x}}_{2\alpha}\| \leq b_{x_{2\alpha}}$ và $\|\Delta(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, t)\| \leq b_\Delta$, kết hợp với (14) và (15) ta thu được đánh giá sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{p}_1) \|\mathbf{z}_1\|^2 - \lambda_{\min}(\mathbf{p}_2) \|\mathbf{e}_2\|^2 \\ &\quad - \left(\lambda_{\min}(\zeta_1) - \frac{1}{2} \right) \|\mathbf{e}_f\|^2 \\ &\quad - \left(\lambda_{\min}(\mathbf{p}_3) - b_\Delta \right) \|\mathbf{e}_2\|^2 + \frac{1}{2} b_{x_{2\alpha}}^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Như vậy, với việc lựa chọn các tham số thỏa mãn $\lambda_{\min}(\zeta_1) > \frac{1}{2}$ và $\lambda_{\min}(\mathbf{p}_3) > b_\Delta$, (16) trở thành:

$$\dot{V} \leq -\varpi_1 V + \varpi_2, \quad (17)$$

với $\varpi_1 = 2 \min \left\{ \lambda_{\min}(\mathbf{p}_1), \lambda_{\min}(\zeta_1) - \frac{1}{2}, \lambda_{\min}(\mathbf{p}_2) \right\}$ và

$\varpi_2 = \frac{1}{2} b_{x_{2\alpha}}^2$. Phương trình (17) có thể viết lại tương đương như sau:

$$\dot{V} \leq -\varpi_1 V - (\varpi_1(1-l)V - \varpi_2), \quad (18)$$

với $l > 0$. Nếu $V > \frac{\varpi_2}{\varpi_1(1-l)}$, (18) trở thành:

$$\dot{V} \leq -\varpi_1 V. \quad (19)$$

Phương trình (19) cho thấy hàm Lyapunov giảm và đảm bảo các sai lệch bám $\mathbf{z}_1, \mathbf{e}_2$, và sai lệch bộ lọc $\mathbf{e}_f$ duy trì trong miền hội tụ B định nghĩa như sau:

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

Như vậy, khi các sai lệch có xu hướng rời khỏi miền hội tụ B được định nghĩa trong (20), hệ thống sẽ đảm bảo chúng tiến trở lại miền trong khoảng thời gian hội tụ T . Để tính toán thời gian hội tụ T , (19) được chuyển đổi sang dạng phương trình vi phân như sau:

$$dt \leq -\frac{dV}{\varpi_1 V}. \quad (21)$$

Tích phân hai vế trong khoảng thời gian $(0, T)$ ta thu được:

$$T \leq - \int_{V(t=0)}^{V(t=T)} \frac{dV}{\varpi_1 V}. \quad (22)$$

Bằng cách giải (22) dựa trên (9) và (20), thời gian

hội tụ T được đưa ra như sau:

$$T \leq \frac{1}{\varpi_1 l} \ln \left(\frac{\varpi_1(1-l)V(t=0)}{\varpi_2} \right). \quad (23)$$

Do đó, các sai lệch bám và sai lệch bộ lọc đạt được tính bị chặn đều cuối cùng dựa theo [21].

4. Mô phỏng kiểm chứng

Trong phần này, hai kịch bản mô phỏng được thiết lập để kiểm chứng tính hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất. Các ma trận hệ thống trong (1) được xác định

như sau [22]: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$

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

với

$$c_{31} = -c_{13} = 33.8v_y + 1.0948v_\phi, \quad c_{23} = -c_{32} = 25.8v_x;$$

$$d_{11} = 0.7225 + 1.3274|v_x| + 5.8664v_x^2, \quad m_{11} = 25.8,$$

$$d_{22} = 0.8897 + 36.4729|v_y| + 0.805|v_\phi|, \quad m_{22} = 33.8,$$

$$d_{23} = 7.25 + 0.845|v_y| + 3.45|v_\phi|, \quad m_{23} = m_{32} = 1.0948,$$

$$d_{32} = -0.0313 - 3.9565|v_y| - 0.13|v_\phi|, \quad m_{33} = 2.76;$$

$$d_{33} = 1.9 - 0.08|v_y| + 0.75|v_\phi|. \quad \text{Quỹ đạo đặt được}$$

thiết lập như sau:

$$\boldsymbol{\eta}_d = \begin{bmatrix} 5 + 6 \cos\left(\frac{\pi t}{300}\right) \\ -1 + 4 \sin\left(\frac{\pi t}{300}\right) \\ 0.5 + \frac{\pi t}{300} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Tham số điều khiển được cài đặt là $\mathbf{p}_1 = 5\mathbf{I}_3$,

$\mathbf{p}_2 = 5\mathbf{I}_3$, $\mathbf{p}_3 = 10\mathbf{I}_3$, $\xi_1 = 100\mathbf{I}_3$. Bên cạnh đó, điều

kiện ban đầu của hệ thống được chọn là

$\boldsymbol{\eta}(0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$. Hai kịch bản được xây dựng như

sau:

Kịch bản đầu tiên kiểm chứng khả năng bền vững

với một số bất định và nhiễu và so sánh với bộ điều khiển ràng buộc đầu ra (OBLF) trong [20]. Nhiễu môi trường và bất định được tính toán như sau:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{wind}} + \mathbf{d}_{\text{wave}} + \mathbf{d}_u, \quad (25)$$

Trong đó $\mathbf{d}_{\text{wind}} = k_d v_{\text{wind}}^2 \mathbf{k}_h \mathbf{k}_c \mathbf{A}_s$ là nhiễu gió với $k_d = 1.25 \text{ kg/m}^3$ là mật độ không khí, $\mathbf{k}_h = \text{diag}(1.12, 1, 0.1)$ là hệ số biến thiên tốc độ gió, $\mathbf{k}_c = \text{diag}(1.2, 1.1, 0.095)$ là hệ số cản, $\mathbf{A}_s = [0.85 \ 0.32 \ 0.15]^T$ là diện tích bề mặt tối đa, $v_{\text{wind}} = 3.5 \text{ m/s}$ là tốc độ gió;

$$\mathbf{d}_{\text{wave}} = \begin{bmatrix} 5v_x^3 + 3\sin(v_x v_y) + 10\sin(0.5t) \\ 3.2v_x^2 + 4.5\sin(v_y) - 8\sin(0.3t) \\ -6v_\phi^3 - 8\sin(0.9t) + 3\cos(0.1t) \end{bmatrix} \text{ là nhiễu}$$

sóng; $\mathbf{d}_u = 0.2(\mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v})$ là bất định mô hình. Ngoài

ra, các ràng buộc sai lệch vị trí được lựa chọn như sau:

$$k_{1x}^L = k_{1x}^H = k_{1y}^L = k_{1y}^H = (2 - 0.5)e^{-0.5t} + 0.5, \quad \text{và} \\ k_{1\phi}^L = k_{1\phi}^H = (1 - 0.25)e^{-0.5t} + 0.25.$$

Kịch bản 2 được xây dựng trong điều kiện nhiễu và bất định phức tạp hơn để làm nổi bật khả năng ràng

buộc của bộ điều khiển đề xuất, được tính toán như sau:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{wind}} + \mathbf{d}_{\text{wave}} + \mathbf{d}_u + \mathbf{d}_{\text{wn}}, \quad (26)$$

Trong đó nhiễu gió $\mathbf{d}_{\text{wind}}$ trong (26) được xét giống Kịch bản 1 với vận tốc gió $v_{\text{wind}} = 10 \text{ m/s}$; nhiễu sóng

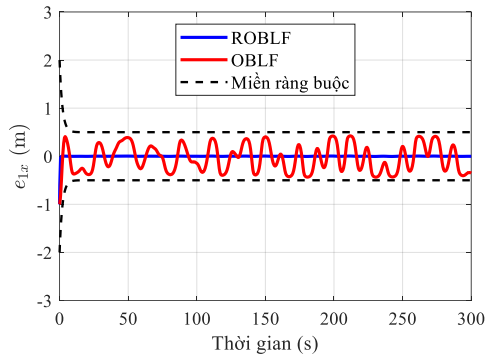
$$\mathbf{d}_{\text{wave}} = \begin{bmatrix} 15v_x^3 + 25\sin(v_x v_y) + 50\sin(0.7t) \\ 12v_x^2 + 35\sin(v_y) - 27\sin(0.2t) \\ -23v_\phi^3 - 18\sin(0.3t) + 35\cos(0.6t) \end{bmatrix}; \text{ bất}$$

định mô hình

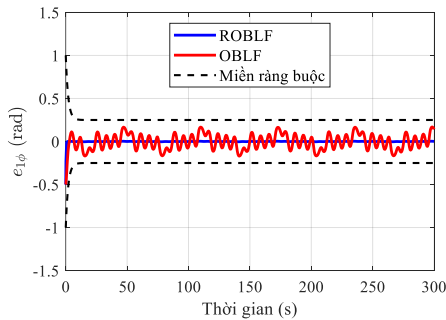
$$\mathbf{d}_u = 0.3\sin(1.2t)\mathbf{C}\mathbf{v} + 0.5\cos(1.4t)\mathbf{D}\mathbf{v}; \text{ và các}$$

loại nhiễu môi trường không lường trước được $\mathbf{d}_{\text{wn}}$

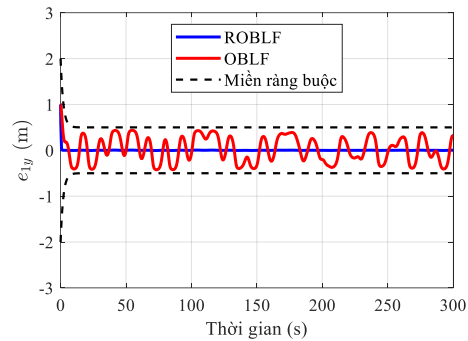
xét thông qua tín hiệu nhiễu trắng. Trong kịch bản này, hai bộ điều khiển hiện đại được sử dụng để so sánh, bao gồm bộ điều khiển trượt bậc phân số (FOSMC) trong [17] và bộ điều khiển dự báo mô hình dựa trên hàm Lyapunov (LMPC) trong [8].



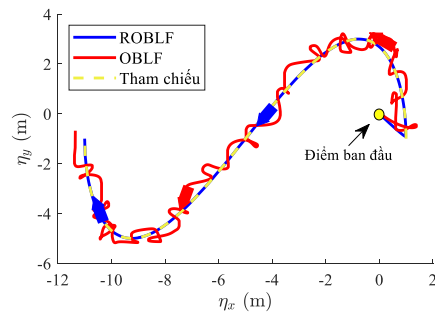
Hình 1. (Kịch bản 1) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động tịnh tiến dọc



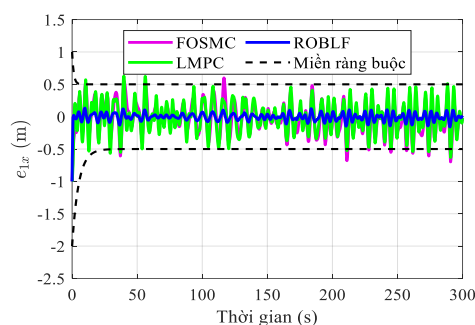
Hình 3. (Kịch bản 1) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động góc quay trực đứng



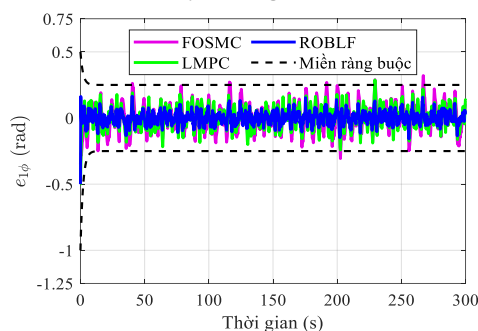
Hình 2. (Kịch bản 1) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động tịnh tiến ngang



Hình 4. (Kịch bản 1) Đáp ứng quỹ đạo của các bộ điều khiển



Hình 5. (Kịch bản 1) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động tịnh tiến dọc

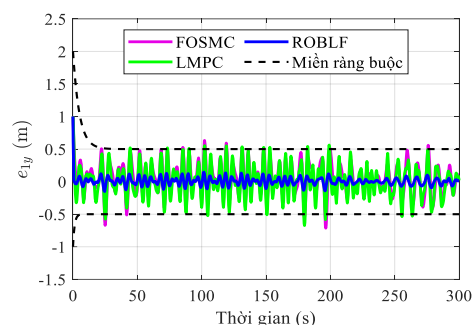


Hình 7. (Kịch bản 2) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động góc quay trực đứng

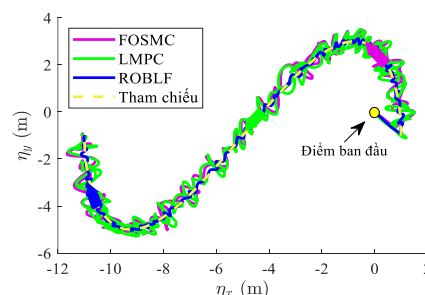
Ngoài ra, khác với nghiên cứu [20] chỉ làm việc với các ràng buộc đối xứng, các ràng buộc bất đối xứng được lựa chọn cho bộ điều khiển đề xuất trong Kịch bản 2 như sau:

$$\begin{aligned} k_{1x}^L &= (2 - 0.5)e^{-0.2t} + 0.5, & k_{1x}^H &= (1 - 0.5)e^{-0.8t} + 0.5, \\ k_{1y}^H &= k_{1x}^L, & k_{1y}^L &= k_{1x}^H, & k_{1\phi}^H &= (0.5 - 0.25)e^{-0.5t} + 0.25, & \text{và} \\ k_{1\phi}^L &= (1 - 0.25)e^{-0.5t} + 0.25. \end{aligned}$$

Kết quả mô phỏng trong Kịch bản 1 được thể hiện qua Hình 1 - 4, cho thấy khả năng bền vững với một số loại nhiễu và bất định của phương pháp đề xuất (ROBLF). Cụ thể, mặc dù cả hai phương pháp ROBLF và OBLF đều duy trì các sai lệch bám quỹ đạo trong miền giới hạn cho trước, song phương pháp đề xuất trong [20] vẫn chưa giải quyết hiệu quả các tác động của nhiễu và bất định lên hệ thống, thể hiện trong Hình 1-3. Trong khi đó, nhờ bổ sung thành phần bền vững $\mathbf{p}_3 \text{sgn}(\mathbf{e}_2)$ trong tín hiệu điều khiển (8), bộ điều khiển đề xuất đã xử lý hiệu quả các tác động của bất định và nhiễu, qua đó đảm bảo các sai lệch vị trí (e_{1x}, e_{1y}) và sai lệch góc lái $(e_{1\phi})$ đạt giá trị nhỏ nhất. Hình 4 mô tả đáp ứng quỹ đạo của bộ điều khiển đề xuất và bộ OBLF, chứng minh khả năng của phương pháp đề xuất trong việc duy trì độ chính xác khi vận hành của hệ thống tàu mặt nước dưới tác động của nhiễu và bất định. Mặc dù bộ điều khiển OBLF có khả năng đảm bảo các sai lệch trong miền ràng buộc,



Hình 6. (Kịch bản 2) Sai lệch bám quỹ đạo theo chuyển động tịnh tiến ngang



Hình 8. (Kịch bản 2) Đáp ứng quỹ đạo của các bộ điều khiển

song đáp ứng hệ thống bị dao động do ảnh hưởng của nhiễu và bất định chưa được giảm thiểu hiệu quả. Qua đó, phương pháp đề xuất cho thấy hiệu suất vượt trội khi cải thiện tính bền vững của hệ thống, giúp tăng cường tính khả thi trong các ứng dụng thực tế.

Trong Kịch bản 2, đáp ứng sai lệch bám quỹ đạo của các bộ điều khiển được thể hiện qua Hình 5 - 7, trong đó bộ điều khiển đề xuất (ROBLF) cho thấy khả năng duy trì ổn định trong miền ràng buộc và giảm thiểu tác động của nhiễu và bất định tốt nhất. Dù cả ba bộ điều khiển được thiết kế đều có khả năng bền vững với một số bất định và nhiễu, song dưới tác động của nhiễu phức tạp, cả bộ điều khiển FOSMC và LMPC đều chưa thể duy trì các sai lệch bám quỹ đạo trong giới hạn cho phép. Cụ thể, bộ điều khiển FOSMC trong [17] chỉ tập trung vào khía cạnh đảm bảo hệ thống tiến tới giá trị đặt mong muốn, dẫn đến không thể duy trì trong miền ràng buộc khi vận hành trong điều kiện khắc nghiệt do không thể triệt tiêu ảnh hưởng của nhiễu lớn. Tương tự, mặc dù bộ điều khiển LMPC trong [8] có khả năng duy trì đáp ứng của hệ thống trong miền vận hành được xác định trước, song việc áp dụng trực tiếp các ràng buộc hằng số lên trạng thái hệ thống khiến miền ràng buộc phải được mở rộng đáng kể đối với các hệ thống có không gian làm việc lớn. Hệ quả là, dưới tác động của nhiễu và các yếu tố bất định, các sai lệch bám không được duy trì trong một giới hạn chặt chẽ như thể

hiện trong các Hình 5-7, dù rằng các ràng buộc trạng thái của hệ thống vẫn được đảm bảo. Bên cạnh đó, cả hai phương pháp FOSMC và LMPC đều yêu cầu chi phí tính toán lớn, do đó làm giảm đi tính ứng dụng trong thực tế của chúng. Ngược lại, nhờ xem xét các ràng buộc biến thiên bất đối xứng cũng như tích hợp khả năng giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu và bất định, phương pháp đề xuất cho thấy độ hiệu quả trong việc duy trì các sai lệch hệ thống ổn định trong miền ràng buộc chặt chẽ, đồng thời đảm bảo các sai lệch bám quỹ đạo nhỏ nhất trong cả ba phương pháp như thể hiện trong các Hình 5-8.

5. Kết luận

Tổng kết lại, nghiên cứu này đã phát triển bộ điều khiển bền vững ràng buộc không gian làm việc cho hệ thống tàu mặt nước chịu tác động của bất định và nhiễu môi trường. Bằng cách kết hợp hàm Lyapunov rào chắn và điều khiển bề mặt động, thuật toán điều khiển đề xuất đảm bảo đồng thời việc tối thiểu hóa sai lệch bám quỹ đạo và duy trì hệ thống trong miền giới hạn an toàn. Tính ổn định của hệ thống được kiểm chứng dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov cũng như được đánh giá thông qua một số kịch bản mô phỏng. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại tập trung vào phát triển bộ điều khiển ràng buộc đầu ra nhằm đảm bảo khía cạnh vận hành an toàn mà chưa giải quyết độ chính xác của hệ thống trong các điều kiện phức tạp. Vì vậy, để giải quyết đồng thời khía cạnh an toàn và tính chính xác khi vận hành của hệ thống, một khung điều khiển ràng buộc tích hợp bộ quan sát nhiễu sẽ được phát triển trong tương lai nhằm xử lý hiệu quả ảnh hưởng của nhiễu tác động lên hệ thống, tăng cường khả năng ứng dụng trong thực tế.

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**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. R. Karimi and Y. Lu, (2021), *Guidance and control methodologies for marine vehicles: A survey*, Control Engineering Practice, Vol.111, p. 104785.
- [2] Nguyễn Văn Tiến, Đỗ Khắc Tiệp, (2025), *Nghiên cứu tối ưu tham số bộ điều khiển PID cho ổn định quỹ đạo tàu thủy sử dụng thuật giải di truyền*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 82-2025, tr. 190-194.
- [3] Yutu Ye, Wang Yiting, Wang Lei, and Wang Xuefeng, (2023), *A modified predictive PID controller for dynamic positioning of vessels with an autoregressive model*, Ocean Engineering, Vol.284, p. 115176.
- [4] Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng, (2019), *Thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt dựa theo nguyên lý RHC trên nền LQR*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông Vận tải, Số 32.
- [5] Padideh Rasouli, Shojaei Khoshnam, and Abbas Chatraei, (2016), *Output feedback look-ahead position control of electrically driven fast surface vessels*, Automatika, Vol.57, No.4, pp.968-981.
- [6] Z. Yin, W. He, C. Yang, and C. Sun, (2018), *Control design of a marine vessel system using reinforcement learning*, Neurocomputing, Vol.311, pp.353-362.
- [7] C. Shen, Y. Shi, and B. Buckham, (2017) *Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.65, No.7, pp.5796-5805.
- [8] Phạm Văn Triệu, (2024), *Kiểm soát dự báo mô hình dựa trên điều khiển Lyapunov phân cấp cho tàu thủy dưới tác động nhiễu gió*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 79-2024.
- [9] Jawhar Ghommam, Faïçal Mnif, and Khaled Metwally, (2008), *Backstepping technique for tracking control of an underactuated surface vessel with unmeasured thruster dynamic*, IFAC Proceedings Volumes, Vol.41, No.2, pp.2324-2329.
- [10] Leticia Mayumi Kinjo et al. (2024), *Tracking control of docking maneuvers for a fully actuated surface vessel using backstepping*, IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- [11] S. Yin and B. Xiao, (2017), *Tracking control of surface ships with disturbance and uncertainties rejection capability*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.22, No.3, pp.1154-1162. doi: 10.1109/TMECH.2016.2618901.
- [12] Zhipeng Shen, Bi Yannan, Wang Yu, and Guo Chen, (2020), *MLP neural network-based recursive sliding mode dynamic surface control for trajectory tracking of fully actuated surface vessel subject to unknown dynamics and input*

- saturation, Neurocomputing, Vol.377, pp.103-112.
- [13] Omid Elhaki and Shojaei Khoshnam, (2021), *Robust saturated dynamic surface controller design for underactuated fast surface vessels including actuator dynamics*, Ocean Engineering, Vol.229, p. 108987.
- [14] Zhiqian Liu, (2019), *Practical backstepping control for underactuated ship path following associated with disturbances*, IET Intelligent Transport Systems, Vol.13, No.5, pp.834-840.
- [15] Tieshan Li, Zhao Rong, Chen C. Philip, Fang Liyou, and Liu Cheng, (2018), *Finite-time formation control of underactuated ships using nonlinear sliding mode control*, IEEE Transactions on Cybernetics, Vol.48, No.11, pp.3243-3253.
- [16] Ruiting Yu, Zhu Qidan, Xia Guihua, and Liu Zhe, (2012), *Sliding mode tracking control of an underactuated surface vessel*, IET Control Theory & Applications, Vol.6, No.3, pp.461-466.
- [17] C. Van Binh, D. Viet Thang, M. Duy Lam, T. Thi Dieu Trinh, D. Van Trong, and P. Van Trieu, (2024), *A state observer-based robust control approach for surface vessel using fractional-order calculus and neural network*, in Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2024, pp. 951-956.
doi: 10.1109/ATC63255.2024.10908182.
- [18] Phạm Văn Triệu, Đặng Văn Trọng, (2022), *Điều khiển bám quỹ đạo dựa trên bộ điều khiển bền vững cho tàu thủy*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 69, tr. 16-21.
- [19] Mien Van, (2019), *An enhanced tracking control of marine surface vessels based on adaptive integral sliding mode control and disturbance observer*, ISA Transactions, Vol.90, pp.30-40.
- [20] Keng Peng Tee, Beibei Ren, and Shuzhi Sam Ge, (2011), *Control of nonlinear systems with time-varying output constraints*, Automatica, Vol.47, No.11, pp.2511-2516.
- [21] F. W. Lewis, Suresh Jagannathan, and Aydin Yesildirak, (2020), *Neural Network Control of Robot Manipulators and Non-linear Systems*, CRC Press.
- [22] Roger Skjetne, Thor I. Fossen, and Petar V. Kokotović, (2005), *Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory*, Automatica, Vol.41, No.2, pp.289-298.

Ngày nhận bài:	22/10/2025
Ngày nhận bản sửa:	20/12/2025
Ngày duyệt đăng:	01/01/2026