

ĐIỀU KHIỂN BẮM QUỸ ĐẠO DỰA TRÊN BỘ ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG CHO TÀU THỦY

TRACKING CONTROL BASED ON ROBUST CONTROLLER FOR SURFACE VESSEL

PHẠM VĂN TRIỆU^{1*}, ĐẶNG VĂN TRỌNG²

¹Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Điện, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email liên hệ: phamvantrieu@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Một cấu trúc điều khiển tầng kết hợp với bộ lọc nhiễu phi tuyến sẽ được đưa ra trong bài báo này nhằm đối phó với những yếu tố bất định có trong mô hình tàu thủy. Việc biến đổi mô hình toán học giúp giảm sự phụ thuộc vào mô hình khi thiết kế thuật toán dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu và bộ lọc nhiễu. Tính ổn định của bộ điều khiển cho mô hình tàu thủy được xem xét. Các kết quả mô phỏng chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất và so sánh với bộ điều khiển trượt cơ bản.

Từ khóa: Tàu thủy, Kỹ thuật cuốn chiếu, Bộ điều khiển trượt, Bộ điều khiển bền vững, Bộ lọc nhiễu.

Abstract

In this paper, a cascade control structure combined with a nonlinear disturbance filter will be introduced to deal with the uncertainties in the surface vessel model. The transformation of the mathematical model helps to reduce the dependence on the model when designing algorithms based on backstepping techniques and disturbance filter. The stability of the controller for the surface vessel model is considered. The simulation results demonstrate the efficiency of the proposed controller and compare it with a regular sliding mode controller.

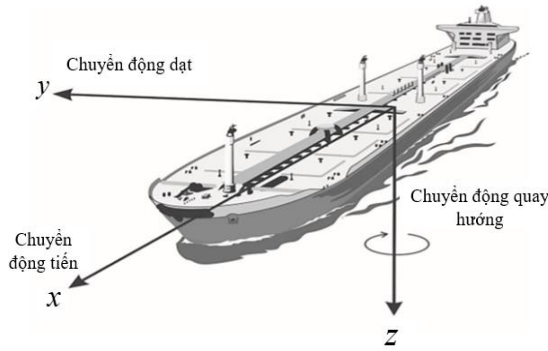
Keywords: Surface vessel, Backstepping technique, Sliding Mode Control (SMC), Robust controller, Disturbance filter.

1. Giới thiệu

Tàu thủy đóng một vai trò thiết yếu trong nhiều ứng dụng như: giao thông vận tải, quân sự, thăm dò môi trường,... không có người lái do điều kiện rủi ro mà các thủy thủ và người sử dụng lao động có thể gặp phải. Tuy nhiên, việc kiểm soát tự động hệ thống hàng hải có rất nhiều khó khăn do điều kiện hoạt động luôn chịu ảnh hưởng của các động lực phi tuyến tính rất phức tạp của môi trường đại dương, chẳng hạn như gió, sóng và dòng chảy. Vì vậy, những năm gần đây

đã chứng kiến sự phát triển về mặt thiết kế điều khiển cho các hệ thống tàu nổi với thành phần bất định và nhiễu bên ngoài [1], [2] và [3]. Trong số các cách tiếp cận để tăng cường bộ điều khiển thích ứng mạnh mẽ, mô hình của hệ thống tàu thủy có thể được xem xét trong hai trường hợp liên quan đến hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành [4], [5] và hệ thống đủ cơ cấu chấp hành [6]. Trong nghiên cứu [7], mặc dù cấu trúc điều khiển tầng cũng được xem xét trong tình huống đủ cơ cấu chấp hành, nhưng rõ ràng là khác với các phương pháp hiện có trong [4], kỹ thuật sử dụng hàm Lyapunov chặn (BLF) được trình bày để giải quyết vấn đề ràng buộc sai số. Một số phương pháp thích nghi truyền thống đã được trình bày trong [8], [9] trong đó cơ chế thích nghi được sử dụng để tính gần đúng các tham số chưa biết. Phương pháp cuốn chiếu được mở rộng với máy quan sát nhiễu được trình bày trong [10]. Trong [11] và [12], mặt trượt tích phân được sử dụng để có được chiến lược điều khiển chế độ trượt (SMC) kết hợp với mạng nơ-ron để ước lượng giới hạn thành phần bất định của hệ thống. Ngoài ra, kỹ thuật điều khiển hiện đại đã được phát triển với việc sử dụng lý thuyết mờ, mạng nơ-ron nhân tạo để xấp xỉ mô hình như trong các nghiên cứu [13], [14]. Từ những nghiên cứu để giải quyết ảnh hưởng của bất định và nhiễu ngoài cho hệ tàu thủy, nhóm tác giả đề xuất một cấu trúc điều khiển tầng dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu kết hợp với bộ lọc nhiễu phi tuyến nhằm nâng cao chất lượng điều khiển của đối tượng tàu thủy. Thêm vào đó, việc biến đổi mô hình động lực học cũng giúp giảm một phần sự phụ thuộc của thuật toán điều khiển vào thông số mô hình.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ trình bày những nội dung chính như sau: Trong Phần 2, phân tích mô hình động lực học và biến đổi để tạo nền tảng cho việc thiết kế điều khiển; thuật toán điều khiển bền vững với phương pháp lọc nhiễu được trình bày trong Phần 3, trong Phần 4, thể hiện kết quả mô phỏng được thực hiện trên ngôn ngữ lập trình MATLAB/Simulink; cuối cùng, kết luận về bài báo.



Hình 1. Mô hình tàu thủy 3D

2. Mô hình động lực học tàu thủy

Khi đối tượng tàu thủy chuyển động trên đại dương cũng được xem xét giống như tàu chuyển động trên mặt phẳng nằm ngang, tiếp tuyến với bề mặt trái đất. Trong chuyển động của tàu thủy thường được mô tả bởi 3 chuyển động thành phần bao gồm: Chuyển động tiến, chuyển động dạt và chuyển động quay hướng; các chuyển động lên xuống, chuyển động quay lắc và chuyển động quay lật bị bỏ qua. Do đó từ mô hình chuyển động sáu bậc tự do của phương tiện hàng hải trong [15], phương trình chuyển động của tàu thủy chỉ còn ba bậc tự do gồm $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta]^T$ và $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$.

Qua việc phân tích về vị trí, hướng của chuyển động và các lực gây ra chuyển động trong [15], mô hình động lực học phi tuyến của tàu thủy ba bậc tự do như sau:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} + \Delta(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \quad (2)$$

trong đó $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ma trận quay xung quanh trục z, $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quán tính hệ thống, $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ma trận Coriolis và lực ly tâm, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ là ma trận suy giảm thủy động lực học, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ lực đẩy và lực trọng trường, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ là véc tơ chứa các biến điều khiển và $\Delta(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ gồm các véc tơ lực và mô men nhiễu từ môi trường cũng như các thành phần không xác định của mô hình tàu.

Hệ thống (1) và (2) thỏa mãn các tính chất sau:

- (i) Ma trận quán tính của hệ thống là ma trận đối xứng xác định dương ($\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > \mathbf{0}$).
- (ii) Ma trận Coriolis và lực hướng tâm là ma trận đối xứng lệch ($\mathbf{C}(\mathbf{v}) = -\mathbf{C}^T(\mathbf{v})$).
- (iii) Ma trận suy giảm thủy động lực học là ma trận xác định dương ($\mathbf{D}(\mathbf{v}) > \mathbf{0}$).

(iv) Ma trận quay quanh trục z là ma trận trực giao

$$(\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})).$$

Giả sử tất cả các biến đều có thể đo được và tính được tín hiệu điều khiển ở phương trình (2), có dạng:

$$\mathbf{u} = \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{M}\mathbf{u}^* \quad (3)$$

trong đó \mathbf{v}_r là giá trị đặt, \mathbf{u}^* là tín hiệu đầu vào sau khi lọc nhiễu. Thế phương trình (3) và phương trình (2) ta có:

$$\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\tau}_d = \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}^* \quad (4)$$

trong đó $\boldsymbol{\tau}_d = -\mathbf{M}^{-1}\Delta(\mathbf{q}, \mathbf{v})$.

Như vậy, ta đã xây dựng được mô hình toán học cho đối tượng tàu thủy với các quan hệ của các tín hiệu vào ra mà đã giảm bớt sự phụ thuộc vào thông số mô hình trong phương trình (4), phép biến đổi này tạo điều kiện để ta thực hiện thiết kế điều khiển trong phần tiếp theo.

3. Điều khiển bền vững

Trong phần này, chúng tôi trình bày phương pháp điều khiển tầng dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu kết hợp với bộ lọc nhiễu để xây dựng bộ điều khiển nhằm mục tiêu bám quỹ đạo cho hệ tàu thủy. Ý tưởng điều khiển tầng có hai vòng điều khiển chính để đưa ra tín hiệu điều khiển cuối cùng. Ở vòng ngoài, tín hiệu đầu ra phản hồi về và kết hợp với tín hiệu đặt để tính toán ra sai lệch, sai lệch đó được xử lý và tính toán thông qua bộ điều khiển ảo để đưa ra tín hiệu đầu vào cho vòng điều khiển thứ hai. Ở vòng điều khiển trong, sai lệch tốc độ được đưa vào để tìm ra tín hiệu điều khiển chưa qua khâu lọc nhiễu. Chính vì vậy sau đó tín hiệu thô được xử lý nhiễu thông qua bộ lọc nhiễu (bù nhiễu) và tín hiệu điều khiển sau cùng được đưa vào hệ thống để điều khiển mô hình.

Để thiết kế điều khiển, chúng tôi giả sử rằng thành phần bất định và đạo hàm của nó được chặn bởi các giá trị, cụ thể:

$$\Delta(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \leq \Delta_{\max} \quad (5)$$

hoặc:

$$\boldsymbol{\tau}_d \leq \mathbf{M}^{-1}\Delta_{\max} \quad (6)$$

3.1. Chiến lược kiểm soát hệ thống

Đầu tiên, định nghĩa sai lệch bám được tính dựa trên quỹ đạo tham chiếu $\mathbf{q}_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ xác định như sau:

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{q} - \mathbf{q}_r = \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Và:

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d \quad (8)$$

với \mathbf{v}_d là tín hiệu điều khiển ảo.

Mô hình động lực học với tín hiệu điều khiển chưa qua khâu lọc được viết lại từ phương trình (4) như sau:

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1 \quad (9)$$

Tiếp theo, thực hiện đạo hàm \mathbf{e}_1 theo thời gian, ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_1 &= \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{v} - \dot{\mathbf{q}}_r \\ &= \mathbf{J}(\mathbf{q})(\mathbf{e}_2 + \mathbf{v}_d) - \dot{\mathbf{q}}_r \end{aligned} \quad (10)$$

Tín hiệu điều khiển ảo được xác định như sau:

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})(-\mathbf{k}_1\mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{q}}_r) \quad (11)$$

trong đó $\mathbf{k}_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{22}, k_{33})$ là ma trận xác định dương.

Cuối cùng, tín hiệu điều khiển \mathbf{u}_1 được tìm dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu với việc đạo hàm sai lệch \mathbf{e}_2 :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_2 &= \dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_d \\ &= \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1 - \dot{\mathbf{v}}_d \end{aligned} \quad (12)$$

Tín hiệu điều khiển được xác định như sau:

$$\mathbf{u}_1 = -\dot{\mathbf{v}}_r - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{v}}_d - \mathbf{k}_2\mathbf{e}_2 \quad (13)$$

Tính ổn định của bộ điều khiển được xem xét bởi hàm ứng viên Lyapunov được chọn

$$\mathbf{V}_1 = \frac{1}{2}\mathbf{e}_1^T\mathbf{e}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{e}_2^T\mathbf{e}_2 \quad (14)$$

Thế công thức (10) và (12) vào đạo hàm công thức (14) theo thời gian:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 &= \mathbf{e}_1^T\dot{\mathbf{e}}_1 + \mathbf{e}_2^T\dot{\mathbf{e}}_2 \\ &= \mathbf{e}_1^T(\mathbf{J}(\mathbf{q})(\mathbf{e}_2 + \mathbf{v}_d) - \dot{\mathbf{q}}_r) + \mathbf{e}_2^T(\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1 - \dot{\mathbf{v}}_d) \end{aligned} \quad (15)$$

Tín hiệu điều khiển (11) và (13) thay vào (15), ta được:

$$\dot{\mathbf{V}}_1 = -\mathbf{e}_1^T\mathbf{k}_1\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2^T\mathbf{k}_2\mathbf{e}_2 \quad (16)$$

Rõ ràng, với mọi ma trận $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2 > 0$ thì $\dot{\mathbf{V}}_1 < 0$.

3.2. Phương pháp lọc nhiễu

Nhằm mục tiêu nâng cao chất lượng điều khiển, bộ phận ước lượng thành phần nhiễu được cộng thêm vào đầu vào điều khiển được thiết kế trong Phần 3.2.

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 \quad (17)$$

Phương trình bộ lọc nhiễu được đề xuất như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{v}}} = -\frac{1}{\sigma}(\hat{\mathbf{v}} - \mathbf{v}) + \mathbf{u}^* + \dot{\mathbf{v}}_r \\ \mathbf{u}_2 = \frac{1}{\sigma}(\hat{\mathbf{v}} - \mathbf{v}) \end{cases} \quad (18)$$

với \mathbf{u}_2 là đầu ra của bộ lọc để bù nhiễu và σ là một số dương đủ nhỏ, có ràng buộc.

Để xem xét tính ổn định của cả hệ thống, sai lệch giữa thành phần nhiễu và giá trị bù nhiễu:

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{u}_2 - \boldsymbol{\tau}_d \quad (19)$$

Thực hiện đạo hàm công thức (19), ta có:

$$\sigma\dot{\mathbf{e}}_3 = -\mathbf{e}_3 - \sigma\dot{\boldsymbol{\tau}}_d \quad (20)$$

Để bộ lọc nhiễu đạt hiệu suất cao thì sai lệch này cần phải tiệm cận về không, ta xem xét hàm Lyapunov như sau:

$$\mathbf{V}_2 = \tilde{\mathbf{V}}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{e}_3^T\mathbf{e}_3 \quad (21)$$

Đạo hàm công thức (21) theo thời gian:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_2 &= \frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_1}{\partial \mathbf{v}}(\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1 + \mathbf{e}_3) + \mathbf{e}_3^T\dot{\mathbf{e}}_3 \\ &= \frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_1}{\partial \mathbf{v}}(\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1) + \frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_1}{\partial \mathbf{v}}\mathbf{e}_3 - \frac{1}{\sigma}\mathbf{e}_3^T\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_3^T\dot{\boldsymbol{\tau}}_d \end{aligned} \quad (22)$$

Dựa trên nghiên cứu [16], ta có các đánh giá sau:

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_1}{\partial \mathbf{v}}(\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{u}_1) \leq -\|\mathbf{v}\|^2 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_1}{\partial \mathbf{v}}\mathbf{e}_3 \leq k_3\|\mathbf{v}\|\|\mathbf{e}_3\| \leq \frac{1}{2}\|\mathbf{v}\|^2 + \frac{k_3}{2}\|\mathbf{e}_3\|^2 \quad (24)$$

$$\|\dot{\boldsymbol{\tau}}_d\| \leq k_4\|\mathbf{e}_3\| \quad (25)$$

trong đó k_3 và k_4 là các giá trị dương. Thay công thức (23), (24) và (25) vào công thức (22), ta có:

$$\dot{\mathbf{V}}_2 \leq -\frac{1}{2}\|\mathbf{v}\|^2 - \left(\frac{1}{\sigma} - \frac{k_3}{2} - k_4\right)\|\mathbf{e}_3\|^2 \quad (26)$$

Như vậy, rõ ràng để $\dot{\mathbf{V}}_2$ là xác định âm nếu chúng ta lựa chọn giá trị σ thỏa mãn điều kiện

$$0 < \sigma < \frac{1}{\frac{k_3}{2} + k_4} \quad (27)$$

4. Mô phỏng

Để có thể thấy hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất một cách trực quan, việc mô phỏng kiểm chứng trên phần mềm MATLAB/Simulink với thời gian trích mẫu 0,01s sẽ được thực hiện. Thêm vào đó, chúng tôi sẽ thực hiện so sánh bộ điều khiển đã được thiết kế với một cấu trúc điều khiển bền vững dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu và bộ điều khiển trượt cơ bản. Dựa trên tài liệu [17], chúng tôi đưa ra tín hiệu điều khiển của cấu trúc được so sánh như sau:

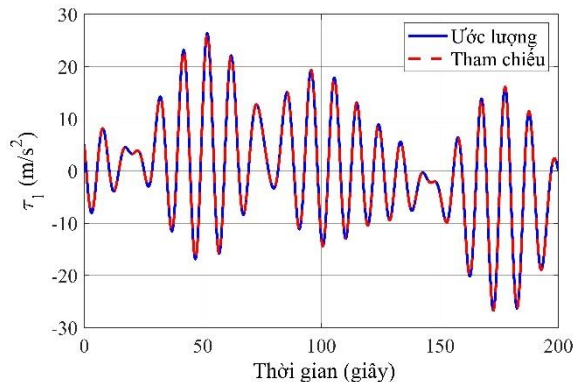
$$\begin{cases} \mathbf{v}_d = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})(-\mathbf{k}_1\mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{q}}_r) \\ \mathbf{u}^* = -\dot{\mathbf{v}}_r - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{e}_1 + \dot{\mathbf{v}}_d - \mathbf{k}_2 \text{sgn}(\mathbf{e}_2) \end{cases} \quad (28)$$

Trong quá trình thực hiện mô phỏng kiểm chứng, chúng tôi sử dụng mô hình tàu thủy có khối lượng là $6,4 \cdot 10^6$ kg, chiều dài là 76,2 m dựa vào công bố [13].

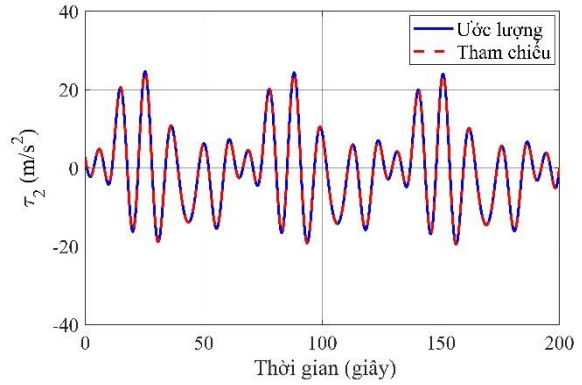
Quỹ đạo đặt và nhiễu được đưa ra như sau:

$$\mathbf{q}_r = \begin{bmatrix} 1000 \sin(0,1t + \frac{\pi}{2}) \\ 1000 \sin(0,1t) \\ \arcsin(\sin(0,1t)) + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 1000 (m) \\ 1000 (m) \\ 0 (rad) \end{bmatrix}$$

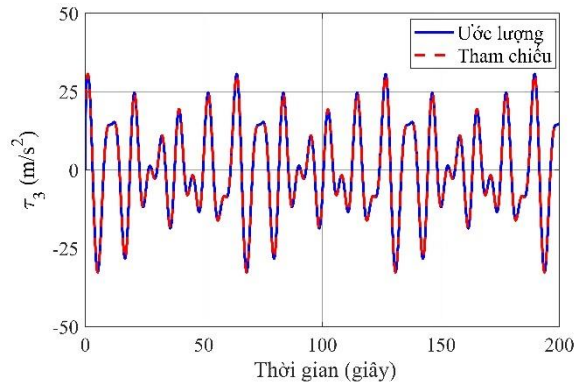
Tham số điều khiển được chọn với $\mathbf{k}_1 = 10\mathbf{I}_3$, $\mathbf{k}_2 = 20\mathbf{I}_3$, $\sigma = 0,01$ đã cho ra kết quả như sau:



Hình 2. Khả năng bù nhiễu τ_1

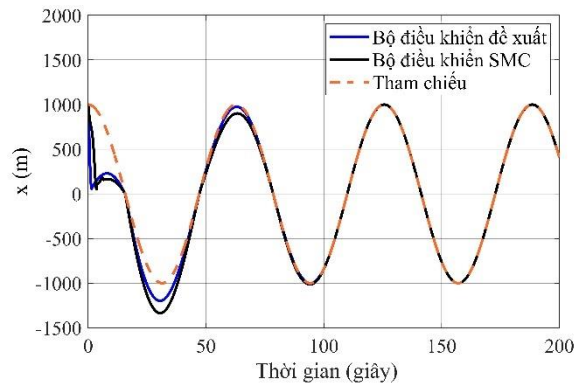


Hình 3. Khả năng bù nhiễu τ_2

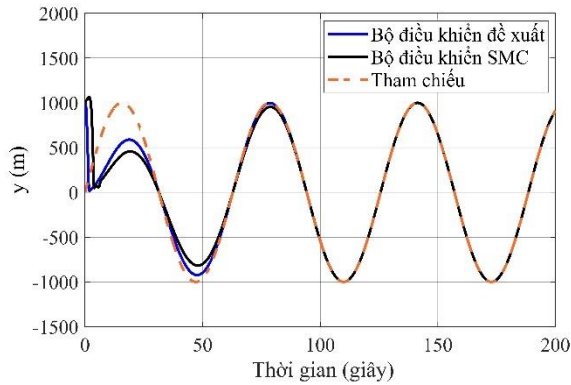


Hình 4. Khả năng bù nhiễu τ_3

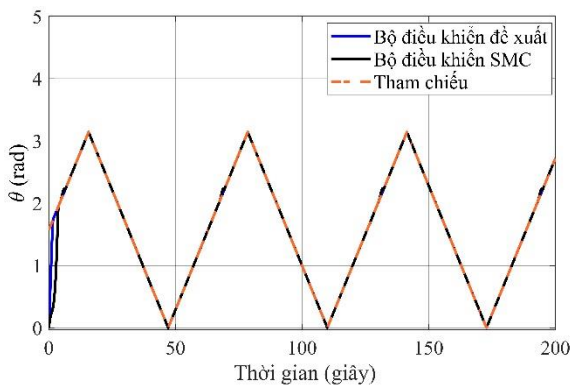
Dựa trên kết quả đáp ứng của Hình 2, Hình 3 và Hình 4, ta thấy phương pháp bù nhiễu phi tuyến của bộ điều khiển bền vững đề xuất cho kết quả tốt, khả năng bù trừ nhanh và sai số của bộ lọc thấp. Những đáp ứng về quỹ đạo của hệ tàu thủy được đưa ra trong Hình 5, Hình 6, Hình 8 nhằm so sánh hiệu suất điều khiển của bộ điều khiển đề xuất và cấu trúc điều khiển bền vững dựa trên bộ điều khiển trượt. Với cấu trúc điều khiển bền vững đề xuất, thời gian đáp ứng là 46s, vượt trội hơn hẳn bộ điều khiển chế độ trượt do khả năng bù trừ những thành phần bất định phi tuyến của mô hình.



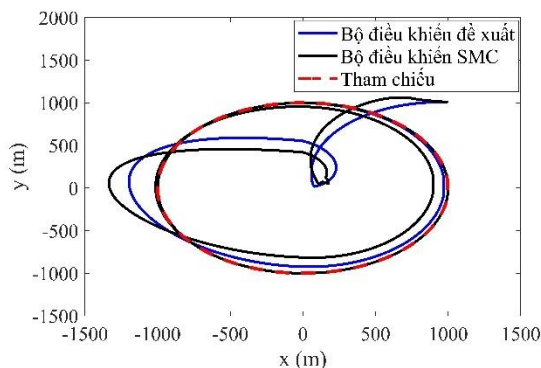
Hình 5. Đáp ứng chuyển động tiến



Hình 6. Đáp ứng chuyển động dạt



Hình 7. Đáp ứng chuyển động quay hướng



Hình 8. Quỹ đạo tàu thủy

5. Kết luận

Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã trình bày được một cấu trúc điều khiển bền vững để đối phó với những thành phần bất định của hệ thống. Kết quả mô phỏng giữa 2 cấu trúc điều khiển bền vững đã cho thấy ưu điểm về thời gian đáp ứng và độ quá điều chỉnh trong bộ điều khiển của chúng tôi. Trong những nghiên cứu tới, chúng tôi sẽ xem xét đến cả những thành phần nhiễu bên ngoài và sử dụng các phương pháp điều khiển hiện đại (lý thuyết mờ, mạng nơ-ron nhân tạo,...). Ngoài ra, việc nghiên cứu thực nghiệm sẽ được áp dụng để xác nhận kết quả mô phỏng.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT21-22.17.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. W. Li, *Robust adaptive control of underactuated ships with input saturation*, Int. J. Control, Vol.94, No.7, pp.1784-1793, 2021.
doi: 10.1080/00207179.2019.1676467.
- [2] J. Zhang, S. Yu, and Y. Yan, *Fixed-time output feedback trajectory tracking control of marine surface vessels subject to unknown external disturbances and uncertainties*, ISA Trans., Vol.93, pp.145-155, 2019.
doi: 10.1016/j.isatra.2019.03.007.
- [3] N. Wang, S. F. Su, X. Pan, X. Yu, and G. Xie, *Yaw-guided trajectory tracking control of an asymmetric underactuated surface vehicle*, IEEE Trans. Ind. Informatics, Vol.15, No.6, pp.3502-3513, 2019.
doi: 10.1109/TII.2018.2877046.
- [4] B. S. Park, J. W. Kwon, and H. Kim, *Neural network-based output feedback control for reference tracking of underactuated surface vessels*, Automatica, Vol.77, pp.353-359, 2017.
doi: 10.1016/j.automatica.2016.11.024.
- [5] N. Wang, G. Xie, X. Pan, and S. F. Su, *Full-State Regulation Control of Asymmetric Underactuated Surface Vehicles*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.66, No.11, pp.8741-8750, 2019.
doi: 10.1109/TIE.2018.2890500.
- [6] J. Zhang, S. Yu, and Y. Yan, *Fixed-time velocity-free sliding mode tracking control for marine surface vessels with uncertainties and unknown actuator faults*, Ocean Eng., Vol.201, No.1, pp.107107, 2020.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107107.
- [7] H. Qin, C. Li, Y. Sun, X. Li, Y. Du, and Z. Deng, *Finite-time trajectory tracking control of unmanned surface vessel with error constraints and input saturations*, J. Franklin Inst., Vol.357, No.16, pp.11472-11495, 2020.
doi: 10.1016/j.jfranklin.2019.07.019.
- [8] 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.
doi: 10.1016/j.automatica.2004.10.006.

- [9] J. Van Amerongen and A. J. Udink Ten Cate, *Model reference adaptive autopilots for ships*, Automatica, Vol.11, No.5, pp.441-449, 1975.
doi: 10.1016/0005-1098(75)90020-5.
- [10] G. Xia, C. Sun, B. Zhao, and J. Xue, *Cooperative Control of Multiple Dynamic Positioning Vessels with Input Saturation Based on Finite-time Disturbance Observer*, Int. J. Control. Autom. Syst., Vol.17, No.2, pp.370-379, 2019.
doi: 10.1007/s12555-018-0383-4.
- [11] M. Van, *An enhanced tracking control of marine surface vessels based on adaptive integral sliding mode control and disturbance observer*, ISA Trans., Vol.90, pp.30-40, 2019.
doi: 10.1016/j.isatra.2018.12.047.
- [12] 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.
doi: 10.1002/rnc.4455.
- [13] L. J. Zhang, H. M. Jia, and X. Qi, *NNFFC-adaptive output feedback trajectory tracking control for a surface ship at high speed*, Ocean Eng., Vol.38, No.13, pp.1430-1438, 2011.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.07.006.
- [14] H. Thi Tu Uyen, P. Duc Tuan, L. Viet Anh, and P. Xuan Minh, *Adaptive Neural Networks Sliding Mode Backstepping Control for 3DOF Surface Ship with Uncertain Model*, 2018 Int. Conf. Syst. Sci. Eng. ICSSE 2018, pp.1-6, 2018.
doi: 10.1109/ICSSE.2018.8520227.
- [15] T. I. Fossen, *Marine Control System-Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Vol.53, No.9. 2002.
- [16] A. Chakraborty and M. Arcak, *Time-scale separation redesigns for stabilization and performance recovery of uncertain nonlinear systems*, Automatica, Vol.45, No.1, pp.34-44, 2009.
doi: 10.1016/j.automatica.2008.06.004.
- [17] J. Liu and X. Wang, *Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems*, Adv. Sliding Mode Control Mech. Syst., 2011.
doi: 10.1007/978-3-642-20907-9.

Ngày nhận bài:	29/12/2021
Ngày nhận bản sửa:	14/01/2022
Ngày duyệt đăng:	20/01/2022