

ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO TÀU THỦY THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH BẰNG PHƯƠNG PHÁP BACKSTEPPING THÍCH NGHI TRONG ĐIỀU KIỆN BẤT ĐỊNH THAM SỐ VÀ NHIỀU MÔI TRƯỜNG ADAPTIVE BACKSTEPPING-BASED TRAJECTORY TRACKING CONTROL FOR UNDERACTUATED SURFACE VESSELS UNDER PARAMETER UNCERTAINTIES AND ENVIRONMENTAL DISTURBANCES

NGUYỄN HỮU QUYỀN^{1*}, NGUYỄN TIẾN DŨNG²

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh

*Email liên hệ: quyen nh.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1119>

Tóm tắt

Bài báo này nghiên cứu bài toán điều khiển theo dõi quỹ đạo đối với hệ tàu thủy không đủ cơ cấu chấp hành (Underactuated), trong điều kiện hệ thống chịu ảnh hưởng của nhiễu môi trường và tồn tại bất định về tham số trong mô hình. Mô hình phi tuyến mô tả động lực học ba bậc tự do (3-DOF: Degrees Of Freedom) của hệ tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành được thiết lập, trong đó các tham số bất định bao gồm các tham số thủy động lực học và khối lượng được xét đến đồng thời với các nhiễu bên ngoài như sóng, gió và dòng chảy. Trên cơ sở này, phương pháp Adaptive Backstepping được đề xuất nhằm đảm bảo bám quỹ đạo chính xác và ổn định. Luật cập nhật tham số được xây dựng để ước lượng các thành phần bất định của hệ, trong khi hàm Lyapunov được sử dụng để chứng minh tính ổn định của hệ kín. Kết quả mô phỏng số với kích bản chịu tác động nhiễu môi trường và tham số mô hình thay đổi cho thấy bộ điều khiển đề xuất đạt sai số bám quỹ đạo nhỏ hơn và đáp ứng ổn định hơn so với phương pháp điều khiển PID truyền thống. Những kết quả đạt được cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng ứng dụng trong thực tiễn điều khiển tàu thủy, góp phần nâng cao chất lượng điều khiển.

Từ khóa: Backstepping thích nghi, tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành, điều khiển bám quỹ đạo, bất định tham số.

Abstract

This paper investigates the trajectory tracking control problem of underactuated surface vessels in the presence of environmental disturbances and parameter uncertainties. A nonlinear 3-DOF

dynamic model of an underactuated surface vessel is established, in which uncertain parameters, including hydrodynamic coefficients and mass properties, are considered together with external disturbances such as waves, wind, and ocean currents. Based on this model, an Adaptive Backstepping control scheme is developed to ensure accurate trajectory tracking and closed-loop system stability. An adaptive parameter update law is designed to estimate the uncertain system parameters online, while a Lyapunov-based stability analysis is employed to guarantee the stability of the closed-loop system. Numerical simulation results under various environmental disturbances and parameter variations demonstrate that the proposed controller achieves smaller tracking errors and smoother system responses than a conventional PID controller. These results confirm the effectiveness and practical applicability of the proposed control approach for trajectory tracking of underactuated surface vessels.

Keywords: Adaptive Backstepping Control, Underactuated Surface Vessels, trajectory tracking problem, parameter Uncertainties.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho tàu thủy, đặc biệt là các phương tiện mặt nước tự hành (Unmanned Surface Vehicles - USVs), đã nhận được nhiều sự quan tâm do nhu cầu tự động hóa trong các lĩnh vực vận tải, giám sát và khảo sát biển. Tuy nhiên, tàu là đối tượng có tính phi tuyến mạnh và chịu tác động của các nhiễu môi trường như sóng, gió và dòng chảy, khiến việc đảm bảo bám quỹ đạo chính xác và độ ổn định của hệ thống trở nên

phức tạp hơn [1]-[3].

Chuyển động của tàu thủy trên mặt phẳng ngang được mô tả dưới dạng mô hình hệ phi tuyến 3-DOF, trong đó các tham số như khối lượng và lực cản thủy động thường không được xác định chính xác hoặc thay đổi theo điều kiện vận hành [16], [17]. Bên cạnh đó, các nhiễu môi trường là các tín hiệu không biết trước và khó đo lường trực tiếp, gây sai lệch giữa mô hình và thực tế, làm giảm hiệu quả điều khiển [5], [9].

Trong thực tế, nhiều tàu thủy thuộc nhóm hệ thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated), khi số lượng cơ cấu chấp hành nhỏ hơn số bậc tự do của hệ. Đặc điểm này khiến hệ không thể điều khiển độc lập toàn bộ các bậc tự do, do đó bài toán bám quỹ đạo trở nên phức tạp hơn và đòi hỏi các phương pháp điều khiển phù hợp hơn [3], [4].

Nhằm khắc phục các khó khăn nêu trên, nhiều chiến lược điều khiển hiện đại đã được phát triển, bao gồm điều khiển thích nghi, điều khiển mờ, mạng nơ-ron nhân tạo và học tăng cường, để tăng cường độ bền vững và khả năng duy trì ổn định hệ thống khi xuất hiện các thành phần phi tuyến tính cùng những sai số bất định trong quá trình vận hành [1], [2], [7], [8]. Ngoài ra, các phương pháp sử dụng bộ quan sát nhiễu hoặc ràng buộc hiệu suất cũng cho thấy hiệu quả trong việc nâng cao độ bền vững và khả năng chống nhiễu [10]-[12]. Tuy nhiên, các phương pháp này thường có cấu trúc phức tạp hoặc yêu cầu tính toán cao, gây khó khăn trong triển khai thực tế [5], [6].

Backstepping là một phương pháp điều khiển phi tuyến hiệu quả, cho phép thiết kế bộ điều khiển dựa trên lý thuyết Lyapunov một cách có hệ thống và phù hợp với các hệ phi tuyến dạng strict-feedback, bao gồm cả các hệ thiếu cơ cấu chấp hành [4]. Tuy nhiên, phương pháp Backstepping truyền thống thường giả định mô hình hệ thống được biết chính xác, do đó kết quả điều khiển chưa đáp ứng tốt trong điều kiện mô hình tồn tại bất định tham số và nhiễu môi trường.

Từ những thách thức nêu trên, bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển Backstepping thích nghi cho tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành nhằm bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại bất định mô hình và nhiễu môi trường. Phương pháp này xây dựng luật cập nhật tham số để ước lượng các thành phần bất định của hệ, đồng thời sử dụng lý thuyết Lyapunov để đảm bảo tính ổn định của hệ kín.

Tính mới của phương pháp đề xuất nằm ở cơ chế phân tách và xử lý song song hai thành phần tác động tiêu cực lên hệ thống:

1. Các bất định tham số nội tại (khối lượng, lực

cản thủy động phi tuyến) được cấu trúc hóa và triệt tiêu trực tuyến thông qua luật thích nghi đệ quy.

2. Các nhiễu động ngoại vi ngẫu nhiên từ môi trường (sóng, gió, dòng chảy) được kiểm soát bằng kỹ thuật chặn trên ma trận Lyapunov mở rộng.

Cách tiếp cận này giúp giảm tải tính toán so với các bộ điều khiển thông minh phức tạp nhưng vẫn đảm bảo sai số bám quỹ đạo hội tụ về lân cận 0.

Hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm chứng thông qua các thử nghiệm mô phỏng và được đánh giá bằng cách so sánh với phương pháp điều khiển truyền thống.

2. Mô hình toán động lực học tàu thủy

2.1. Mô hình toán động học

Trong mặt phẳng ngang, chuyển động của tàu thủy được mô tả bởi mô hình 3-DOF [16], [17]. Các thành phần chuyển động trên mặt phẳng ngang gồm: tịnh tiến theo trục dọc (surge), trượt ngang (sway) và quay trở (yaw). Vector trạng thái vị trí và hướng của tàu gắn với hệ tọa độ quán tính được mô tả như sau:

$$\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T \quad (1)$$

Trong biểu thức (1), x, y, ψ lần lượt là vị trí và góc hướng của tàu.

Vector vận tốc trong hệ tọa độ Body-fix (hệ tọa độ gắn với thân tàu), được đưa ra như sau:

$$\mathbf{v} = [u, v, r]^T \quad (2)$$

Trong đó: u, v lần lượt là vận tốc theo phương dọc và ngang, còn r là tốc độ quay trở.

Mối quan hệ giữa vận tốc trong hệ thân tàu và hệ quán tính được mô tả bởi phương trình động học [16]:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\psi)\mathbf{v} \quad (3)$$

Trong đó, ma trận chuyển đổi $\mathbf{J}(\psi)$, được cho bởi công thức (4):

$$\mathbf{J}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. Mô hình toán động lực học

Phương trình phi tuyến mô tả động lực học của tàu thủy trong mặt phẳng ngang được cho bởi phương trình (5):

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} \quad (5)$$

Trong đó:

$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ Ma trận khối lượng và quán tính

(thường bao gồm cả khối lượng nước kèm).

$C(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ Ma trận Coriolis và lực ly tâm,

$D(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ Ma trận lực cản thủy động lực học,

$\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$ Vector tín hiệu điều khiển, được tạo ra bởi các cơ cấu chấp hành

$d = [d_u, d_v, d_r]^T$ Nhiễu môi trường (sóng, gió, dòng chảy).

Cách xác định chi tiết các tham số của ma trận $M, C(v), D(v)$ ở trên được Tác giả Fossen [16] và Do K.D cùng cộng sự [17], đưa ra cách tính chi tiết.

Trong thực tế, các tham số trong các ma trận $M, C(v), D(v)$ thường không xác định được chính xác do sự tính toán phụ thuộc vào các yếu tố khác nhau cũng như thay đổi của điều kiện tải trọng và tác động môi trường [16], [17]. Điều này dẫn đến sự tồn tại những bất định tham số (parametric uncertainties) trong mô hình hệ thống.

2.3. Đặc tính thiếu cơ cấu chấp hành

Trong các hệ thống tàu thủy thực tế, đặc biệt là các phương tiện mặt nước tự hành, một số mô hình được trang bị đầy đủ cơ cấu chấp hành cho phép điều khiển trực tiếp tất cả các bậc tự do. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp khác, hệ thống chỉ có khả năng tác động lên một số bậc tự do nhất định, dẫn đến đặc điểm thiếu cơ cấu chấp hành [3], [16], [17].

Cụ thể, trong bài toán này, lực điều khiển chỉ tác động trực tiếp lên các chuyển động surge và yaw, trong khi chuyển động sway không được trực tiếp điều khiển. Khi đó, vector điều khiển có dạng (6):

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ 0 \\ \tau_r \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

hoặc có thể viết lại dưới dạng:

$$\tau = B u_c \quad (7)$$

Trong đó, $u_c = [\tau_u, \tau_r]^T$ Vector điều khiển thực, $B \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ ma trận phân bố điều khiển, được định nghĩa:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Do đặc điểm của hệ underactuated nói chung là không thể điều khiển độc lập từng bậc tự do [3], nên khi thiết kế bộ điều khiển cần khai thác mối liên hệ động lực học giữa các trạng thái của hệ để đạt được

mục tiêu bám quỹ đạo.

2.4. Bất định tham số và nhiễu môi trường

Trong bài toán thực tế, hệ tàu thủy chịu ảnh hưởng đồng thời của bất định tham số và nhiễu môi trường [5], [10].

1. Bất định tham số xuất phát từ việc các hệ số thủy động, khối lượng và lực cản không được xác định chính xác hoặc thay đổi theo thời gian [16], [17]. Các thành phần này có thể được biểu diễn dưới dạng (9):

$$M = M_0 + \Delta M, \quad D(v) = D_0(v) + \Delta D(v) \quad (9)$$

Trong đó, ΔM và $\Delta D(v)$ là các thành phần bất định.

2. Bất định từ nhiễu môi trường bao gồm các tác động bên ngoài như sóng, gió và dòng chảy [5], [9], được mô hình hóa bởi vector $d(t)$. Trong nghiên cứu này, nhiễu được giả thiết là bị chặn:

$$\|d(t)\| \leq d_{max} \quad (10)$$

với d_{max} là một hằng số dương hữu hạn.

Việc tồn tại đồng thời bất định tham số và nhiễu môi trường làm cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo trở nên khó khăn hơn, đồng thời đặt ra yêu cầu đối với bộ điều khiển phải có khả năng thích nghi và đảm bảo tính ổn định của hệ kín.

3. Thiết kế bộ điều khiển Backstepping thích nghi

Backstepping là phương pháp thực hiện thiết kế điều khiển theo cơ chế đệ quy, trong đó luật điều khiển được xây dựng từng bước từ mô hình động học đến động lực học thông qua các biến điều khiển ảo.

Cụ thể, từ sai số vị trí, một tín hiệu điều khiển ảo được thiết kế để tạo ra vận tốc mong muốn; sau đó, dựa trên sai số vận tốc, tín hiệu điều khiển thực được xây dựng nhằm đảm bảo các biến trạng thái hội tụ về giá trị mong muốn.

Tại mỗi bước, một hàm Lyapunov trung gian được lựa chọn nhằm đảm bảo tính ổn định tiệm cận của sai số, qua đó đảm bảo tính ổn định của toàn bộ hệ kín [4].

Để giải quyết triệt để bài toán bám quỹ đạo trong điều kiện bất định, cấu trúc Backstepping hai tầng thiết kế trong chương này sẽ thực hiện cơ chế bù song song.

Tại tầng động học (Kinematic), bộ điều khiển ảo hình thành luật vận tốc mong muốn để ép sai số vị trí về lân cận 0.

Tại tầng động lực học (Dynamic), thuật toán phân tách rõ hai thành phần: luật cập nhật thích nghi tích

phân chịu trách nhiệm ước lượng trực tuyến các tham số thủy động lực học biến thiên và các hệ số khuếch đại phản hồi được tính toán dựa trên hàm Lyapunov tổng quát nhằm áp đặt tính ổn định bị chặn tiêu tán cho toàn hệ kín trước nhiễu môi trường.

3.1. Phát biểu bài toán và mục tiêu điều khiển

Mục tiêu của bài toán đặt ra là thiết kế bộ điều khiển nhằm đảm bảo đối tượng hệ tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo tham chiếu mong muốn (η_{ref}) cho trước: $\eta_{ref} = [x_{ref}, y_{ref}, \psi_{ref}]^T$.

Theo đó, sai số bám quỹ đạo được định nghĩa:

$$e_{\eta} = \eta - \eta_{ref} \quad (11)$$

Lấy đạo hàm biểu thức (11) theo thời gian, khi đó ta có:

$$\dot{e}_{\eta} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_{ref} = J(\psi)v - \dot{\eta}_{ref} \quad (12)$$

Mục tiêu điều khiển là thiết kế tín hiệu điều khiển (τ) sao cho:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{\eta} \rightarrow 0 \quad (13)$$

Với giả thiết tồn tại:

- Bất định tham số trong mô hình động lực học
- Nhiễu môi trường bị chặn.

3.2. Cấu trúc bộ điều khiển đề xuất (Backstepping thích nghi)

Cấu trúc tổng thể của hệ điều khiển được xây dựng theo phương pháp Backstepping thích nghi, với cấu trúc phân tầng. Cấu trúc đề xuất được mô tả như Hình 1.

Kiến trúc của bộ điều khiển được xây dựng từ các khối chức năng chủ yếu sau:

Khối tạo quỹ đạo đặt η_{ref} : Đây là khối tạo ra quỹ đạo đặt, với mục đích điều khiển tàu bám theo quỹ đạo này.

Khối tính toán sai số e_{η} : Thực hiện chức năng tạo ra sai lệch quỹ đạo giữa quỹ đạo tham chiếu và quỹ đạo đặt.

Bộ điều khiển Backstepping (Backstepping Controller): Bộ điều khiển Backstepping được thiết kế theo phương pháp đệ quy, bao gồm hai tầng điều khiển tương ứng với động học (Kinematic Controller) và động lực học (Dynamic Controller) của hệ thống.

- **Khối điều khiển động học:** Nhận tín hiệu sai lệch quỹ đạo e_{η} để tính toán ra tốc độ ảo v_d .

- **Khối điều khiển động lực học:** Nhận tín hiệu sai lệch tốc độ e_v , với luật thích nghi tham số $\hat{\theta}$ tạo ra bởi khối thích nghi để tính toán ra tín hiệu điều khiển τ tác động lên các cơ cấu chấp hành (chân vịt và bánh lái) của tàu.

Khối luật thích nghi (Adaptive law): nhận tín hiệu sai lệch tốc độ e_v để ước lượng tham số bất định.

Khối mô hình đối tượng: Thể hiện mô hình phi tuyến 3-DOF tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành có tham số mô hình bất định (ma trận M , $D(v)$ thay đổi theo tải trọng và điều kiện hoạt động), dưới tác động của nhiễu môi trường $d(t)$.

3.3. Thiết kế điều khiển ảo từ mô hình động học

Xét hàm Lyapunov được lựa chọn dưới dạng [4]:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_{\eta}^T e_{\eta} \quad (14)$$

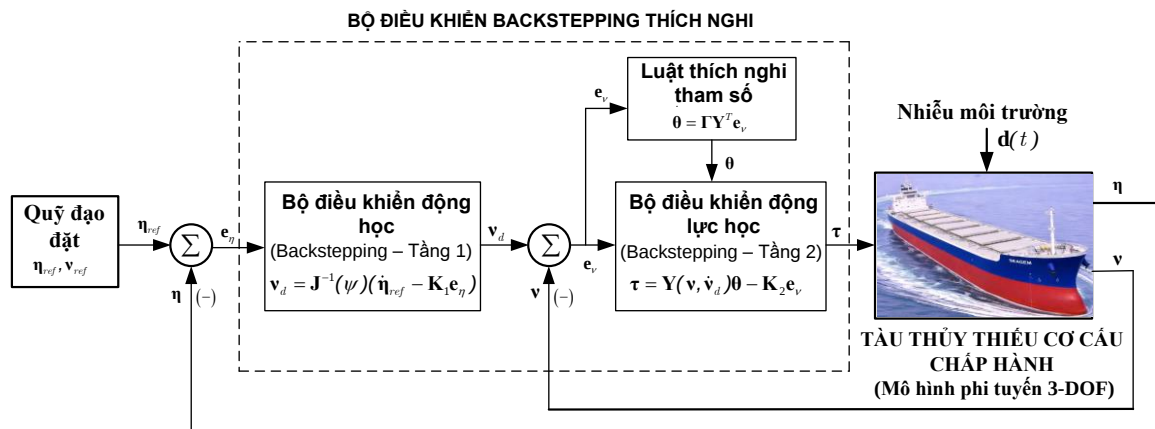
Lấy đạo hàm theo thời gian của (14), ta thu được:

$$\dot{V}_1 = e_{\eta}^T (J(\psi)v - \dot{\eta}_{ref}) \quad (15)$$

Để đảm bảo đạo hàm của hàm Lyapunov là âm xác định, tín hiệu điều khiển ảo (v_d) được lựa chọn như sau:

$$v_d = J^{-1}(\psi)(\dot{\eta}_{ref} - K_1 e_{\eta}) \quad (16)$$

Trong đó, $K_1 > 0$ là ma trận hệ số điều khiển.



Hình 1. Cấu trúc bộ điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy dùng Backstepping thích nghi

Khi đó, đạo hàm của hàm Lyapunov có dạng:

$$\dot{V}_1 = -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta + \mathbf{e}_\eta^T \mathbf{J}(\psi)(\mathbf{v} - \mathbf{v}_d) \quad (17)$$

Sai số vận tốc được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{e}_v = \mathbf{v} - \mathbf{v}_d \quad (18)$$

Bước tiếp theo đặt ra là thiết kế luật điều khiển nhằm đảm bảo $\mathbf{e}_v \rightarrow 0$ và $\dot{V}_1$ âm xác định.

3.4. Thiết kế điều khiển động lực học

Xét hàm Lyapunov mở rộng được lựa chọn dưới dạng:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \mathbf{e}_v^T \mathbf{M} \mathbf{e}_v \quad (19)$$

Lấy đạo hàm (19) theo thời gian, ta thu được:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \mathbf{e}_v^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{e}}_v \quad (20)$$

Dựa trên phương trình động lực học của hệ [16], [17]:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{d}$$

suy ra:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{e}}_v = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}}_d + \mathbf{d} \quad (21)$$

Thay (21) vào biểu thức (20), ta được:

$$\dot{V}_2 = -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta + \mathbf{e}_v^T (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}}_d + \mathbf{d}) \quad (22)$$

Mục tiêu của điều khiển động lực học là thiết kế tín hiệu điều khiển ($\boldsymbol{\tau}$) sao cho $\dot{V}_2$ là âm xác định.

3.5. Luật điều khiển thích nghi

Do trong mô hình động lực học tồn tại các bất định tham số, các thành phần bất định được giả thiết có thể biểu diễn dưới dạng tuyến tính theo tham số (linear-in-parameters) [3], [8] như sau:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}_d) \boldsymbol{\theta} \quad (23)$$

Trong đó: $\boldsymbol{\theta} = [m_{11}, m_{22}, m_{33}, d_{11}, d_{22}, d_{33}]^T$ là vector tham số chưa biết.

$\mathbf{Y}$ là ma trận hồi quy (regressor matrix), được xây dựng từ các biến trạng thái u, v, r và các thành phần động học tương ứng của hệ tàu thủy.

Gọi $\boldsymbol{\theta}$ là ước lượng của $\boldsymbol{\theta}$, luật điều khiển được xây dựng dưới dạng:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{Y}(\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}_d) \boldsymbol{\theta} - \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v \quad (24)$$

Trong đó, $\mathbf{K}_2 > 0$ là ma trận điều khiển.

Để đảm bảo tính ổn định của hệ, luật cập nhật tham số được lựa chọn như sau:

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{Y}^T \mathbf{e}_v \quad (25)$$

Với $\boldsymbol{\Gamma} > 0$ là ma trận hệ số thích nghi.

Với luật điều khiển và luật thích nghi được thiết

kế như trên, có thể chứng minh rằng hệ kín là ổn định theo nghĩa Lyapunov.

3.6. Phân tích ổn định

Xét hàm Lyapunov tổng được lựa chọn dưới dạng [4]:

$$V = V_2 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\theta} \quad (26)$$

Trong đó $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}$ là sai số ước lượng tham số

Do $V_2 > 0$ và $\boldsymbol{\Gamma}^{-1} > 0$, hàm Lyapunov V là hàm dương xác định đối với các biến sai số của hệ. Thành phần thứ nhất phản ánh năng lượng của sai số bám và sai số vận tốc, trong khi thành phần thứ hai phản ánh sai số ước lượng tham số của luật thích nghi.

Lấy đạo hàm theo thời gian của (26), đồng thời thay luật điều khiển (24) và luật cập nhật tham số (25) vào biểu thức đạo hàm của hàm Lyapunov, các thành phần chứa sai số ước lượng tham số $\boldsymbol{\theta}$ được triệt tiêu. Khi đó thu được:

$$\dot{V} = -\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta - \mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v + \mathbf{e}_v^T \mathbf{d} \quad (27)$$

Trong đó, hai thành phần đầu là các hạng âm xác định được tạo ra bởi bộ điều khiển Backstepping, còn thành phần cuối phản ánh ảnh hưởng của nhiễu môi trường lên hệ thống.

Giả sử nhiễu môi trường bị chặn theo điều kiện:

$$\|\mathbf{d}(t)\| \leq d_{max}$$

Áp dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwarz cho tích vô hướng $\mathbf{e}_v^T \mathbf{d}$, ta có:

$$\mathbf{e}_v^T \mathbf{d} \leq \|\mathbf{e}_v\| \|\mathbf{d}\| \leq \|\mathbf{e}_v\| d_{max}$$

Do các ma trận điều khiển $\mathbf{K}_1$ và $\mathbf{K}_2$ được lựa chọn xác định dương, tồn tại các hằng số dương λ_1 và λ_2 sao cho:

$$\mathbf{e}_\eta^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_\eta \geq \lambda_1 \|\mathbf{e}_\eta\|^2$$

$$\mathbf{e}_v^T \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_v \geq \lambda_2 \|\mathbf{e}_v\|^2$$

Suy ra đạo hàm của hàm Lyapunov được đánh giá bởi:

$$\dot{V} \leq -\lambda_1 \|\mathbf{e}_\eta\|^2 - \lambda_2 \|\mathbf{e}_v\|^2 + \|\mathbf{e}_v\| d_{max} \quad (28)$$

Biểu thức (28) cho thấy đạo hàm của hàm Lyapunov là âm ngoài một miền lân cận hữu hạn của gốc tọa độ. Điều này chứng tỏ tất cả các tín hiệu trong hệ kín đều bị chặn. Đồng thời, sai số bám quỹ đạo và sai số vận tốc hội tụ về một lân cận nhỏ của gốc tọa độ với kích thước phụ thuộc vào biên nhiễu d_{max} .

Do đó, có thể kết luận rằng hệ kín là ổn định theo nghĩa Lyapunov. Trong trường hợp tồn tại nhiều môi trường bị chặn, các sai số của hệ là bị chặn đều cuối cùng (Uniformly Ultimately Bounded - UUB). Kết quả này chứng minh bộ điều khiển Adaptive Backstepping đề xuất có khả năng duy trì tính ổn định và chất lượng bám quỹ đạo trong điều kiện tồn tại đồng thời bất định tham số và nhiễu môi trường [4].

4. Mô phỏng bộ điều khiển và nhận xét

4.1. Kịch bản mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, các thí nghiệm mô phỏng được thực hiện trên mô hình tàu thủy phi tuyến 3-DOF, trong mặt phẳng ngang. Kịch bản mô phỏng được giả thiết như sau:

Tàu chạy bám theo quỹ đạo đặt dạng hình sin, biên độ $S=200$ m, xuất phát tại điểm $A(0,0)$ và kết thúc tại điểm $B(750,-200)$, phương trình quỹ đạo tham chiếu được cho như sau:

$$x_{ref} = 200.\cos(0.01t)(m) \quad y_{ref} = 200.\sin(0.005t)(m)$$

Trong đó $\omega = 0.01 \text{ rad/s}$ góc hướng tham chiếu ψ_{ref} được xác định theo hướng tiếp tuyến của quỹ đạo.

Thời gian mô phỏng được thiết lập là $T = 600(s)$ với bước lấy mẫu $T_s = 0.02(s)$. Để đánh giá bộ điều khiển các kết quả mô phỏng quỹ đạo, sai số bám quỹ đạo, tín hiệu điều khiển được đưa ra để so sánh với bộ điều khiển PID.

Để kiểm tra khả năng kháng nhiễu, giả thiết trong kịch bản tàu chịu tác động của nhiễu môi trường tổng hợp được biểu diễn như sau:

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0.5\sin(0.1t) \\ 0.3\sin(0.05t) \\ 0.1\sin(0.2t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Nhiễu này đại diện cho ảnh hưởng của sóng, gió

và dòng chảy trong điều kiện thực tế.

Ngoài nhiễu môi trường, để đánh giá khả năng xử lý bất định tham số, các phần tử của ma trận khối lượng và lực cản thủy động lực học trong kịch bản được giả thiết sai lệch so với giá trị danh định như sau:

$$M = M_0 + \Delta M, \quad D = D_0 + \Delta D \quad (30)$$

$$\text{Với: } \|\Delta M\| \leq 0.2M_0, \quad \|\Delta D\| \leq 0.2D_0.$$

4.2. Các tham số mô phỏng

4.2.1. Tham số của tàu lựa chọn mô phỏng

Các tham số của tàu lựa chọn mô phỏng được thể hiện trên Bảng 1.

4.2.2. Cài đặt tham số bộ điều khiển Backstepping và PID

Tham số của bộ điều khiển Backstepping thích nghi được lựa chọn như sau:

$$K_1 = \text{diag}(0.8, 0.8, 1.0);$$

$$K_2 = \text{diag}(1.5, 0.5, 1.2);$$

$$\Gamma = \text{diag}(0.2, 0.2, 0.2).$$

Các giá trị này được lựa chọn thông qua quá trình thử nghiệm nhằm đảm bảo hệ thống có tốc độ hội tụ nhanh và tín hiệu điều khiển ổn định.

Đối với bộ điều khiển PID, các tham số được tinh chỉnh như sau:

Tham số PID dùng cho kênh điều khiển lực trượt dọc:

$$K_p = 2.0, \quad K_i = 0.05, \quad K_d = 0.8$$

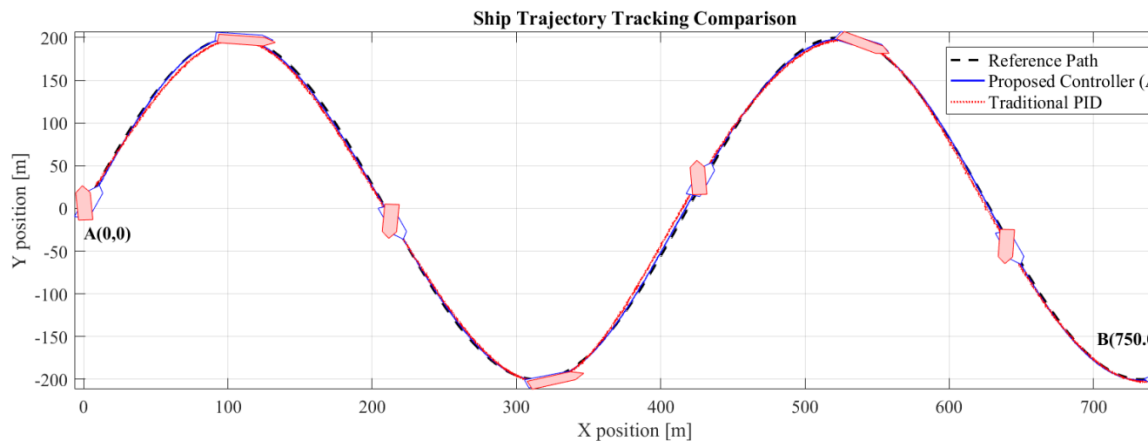
Tham số PID dùng cho kênh điều khiển mô-men quay tròn:

$$K_p = 1.5, \quad K_i = 0.03, \quad K_d = 0.6$$

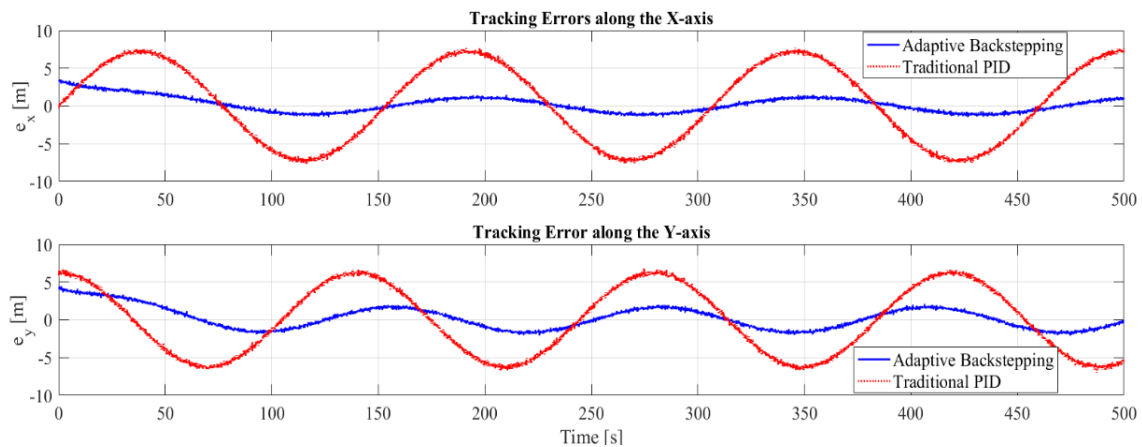
Các tham số PID được lựa chọn nhằm đạt hiệu suất tốt nhất trong cùng điều kiện mô phỏng để đảm bảo tính công bằng trong so sánh.

Bảng 1. Các tham số mô hình tàu mô phỏng

Tham số	Trị số	Tham số	Trị số
Chiều dài tàu		L	$32(m)$
Khối lượng tàu		m	$118 \times 10^3 (Kg)$
Các thông số mô hình toán 3-DOF			
m_{11}	$120 \times 10^3 (Kg)$	d_{u2}	$43 \times 10^2 (Kgm^{-1})$
m_{22}	$177.9 \times 10^3 (Kg)$	d_{u3}	$21.5 \times 10^2 (Kgm^{-2})$
m_{33}	$636 \times 10^5 (Kgm^2)$	d_{v2}	$23.4 \times 10^3 (Kgm^{-1})$
d_{11}	$215 \times 10^2 (Kgs^{-1})$	d_{v3}	$11.7 \times 10^3 (Kgm^{-2})$
d_{22}	$177 \times 10^3 (Kgs^{-1})$	d_{r2}	$160.4 \times 10^4 (Kgm^2)$
d_{33}	$802 \times 10^4 (Kgm^2s^{-1})$	d_{r3}	$80.2 \times 10^4 (Kgm^2s)$



Hình 2. Quỹ đạo chuyển động của bộ điều khiển PID truyền thống và Backstepping thích nghi



Hình 3. Đồ thị so sánh sai số bám quỹ đạo

4.3. Kết quả mô phỏng

4.3.1. Khả năng bám quỹ đạo

Trên Hình 2 thể hiện kết quả mô phỏng điều khiển bám quỹ đạo.

Quan sát đồ thị Hình 2 nhận thấy bộ điều khiển Adaptive Backstepping cho khả năng bám sát quỹ đạo tham chiếu với độ chính xác cao trong toàn bộ quá trình mô phỏng. Quỹ đạo thực tế gần như trùng khít với quỹ đạo mong muốn, kể cả tại các vùng có độ cong lớn.

Ngược lại, bộ điều khiển PID xuất hiện sai lệch rõ rệt tại các đoạn đỉnh và đáy của quỹ đạo, cũng như tại các đoạn có quỹ đạo thay đổi lớn. Sai lệch này thể hiện cả về biên độ và pha, cho thấy hạn chế của PID trong việc xử lý các đặc tính phi tuyến và nhiễu của hệ thống.

Kết quả này cho thấy phương pháp đề xuất có thể cải thiện rõ rệt hiệu suất bám quỹ đạo so với bộ điều khiển truyền thống.

4.3.2. Sai số bám quỹ đạo

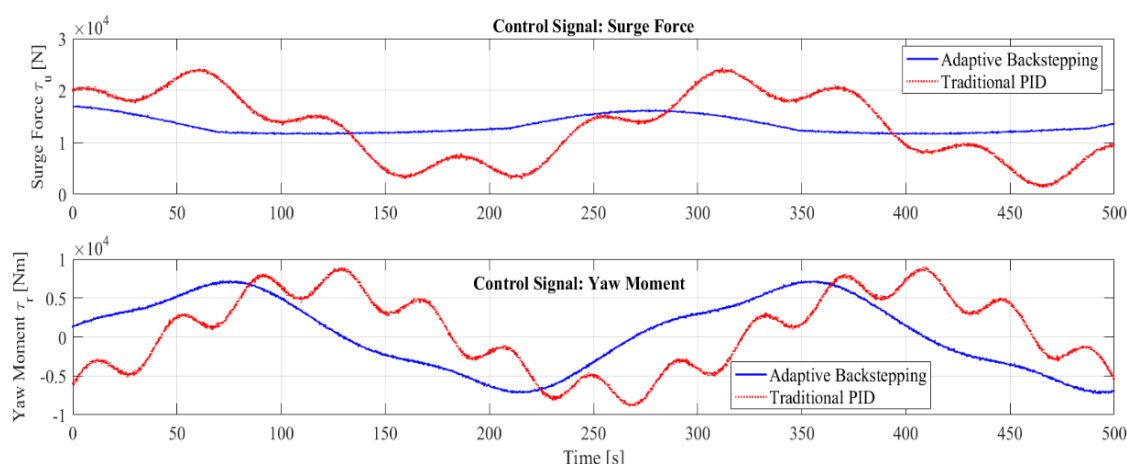
Trên Hình 3 mô tả kết quả mô phỏng sai số bám quỹ đạo. Sai số bám theo các trục X và Y được thể hiện rõ trong các đồ thị sai số theo thời gian.

Quan sát đồ thị Hình 3 nhận thấy sai số của bộ điều khiển Adaptive Backstepping giảm nhanh trong giai đoạn đầu và đạt trạng thái ổn định sau khoảng 45s, sau đó dao động trong một lân cận nhỏ quanh giá trị 0 với biên độ nhỏ. Điều này phản ánh khả năng hội tụ nhanh và tính ổn định cao của bộ điều khiển đề xuất.

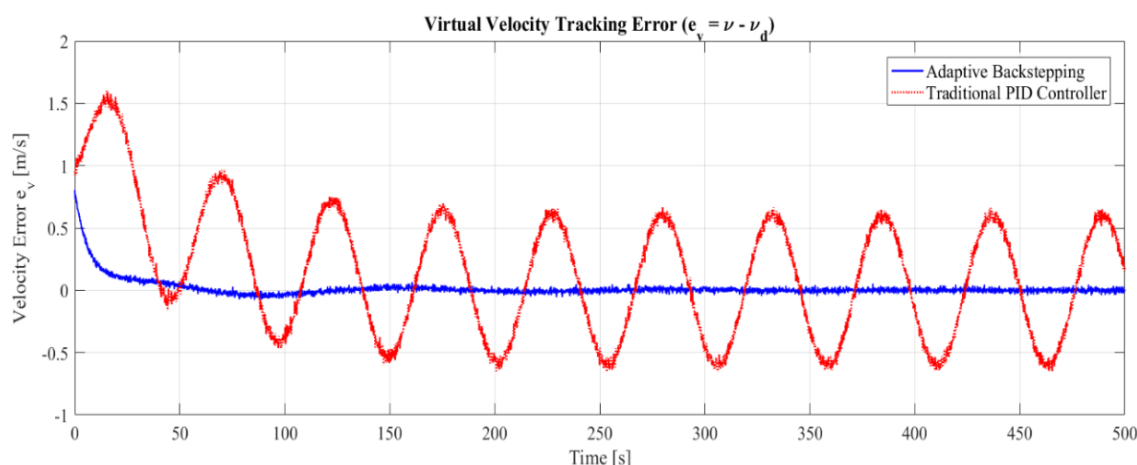
Trong khi đó, bộ điều khiển PID xuất hiện sai số dao động tuần hoàn với biên độ lớn hơn đáng kể và kéo dài trong suốt quá trình mô phỏng. Sai số không có xu hướng suy giảm rõ rệt theo thời gian, đặc biệt tại các vùng có biến thiên quỹ đạo lớn.

Những kết quả này cho thấy Adaptive Backstepping có khả năng xử lý tốt hơn các yếu tố phi tuyến và nhiễu, từ đó cải thiện đáng kể độ chính xác bám quỹ đạo.

4.3.3. Tín hiệu điều khiển



Hình 4. Đáp ứng thành phần lực trượt dọc và mô-men quay trở



Hình 5. Đồ thị sai số vận tốc ảo

Trên Hình 4 mô tả kết quả mô phỏng lực và mô-men quay trở của 2 bộ điều khiển.

Quan sát đồ thị Hình 4 nhận thấy kết quả thu được bộ điều khiển Adaptive Backstepping tạo ra tín hiệu điều khiển trơn tru, biến thiên liên tục và có mức dao động thấp. Điều này rất quan trọng đối với hệ thống thực, giúp giảm tải cho cơ cấu chấp hành và hạn chế hiện tượng rung động.

Ngược lại, bộ điều khiển PID tạo ra tín hiệu điều khiển có dao động lớn hơn và biến thiên nhanh hơn theo thời gian, đặc biệt rõ rệt trên kênh mô men quay. Điều này có thể dẫn đến việc tiêu hao năng lượng lớn hơn và giảm tuổi thọ của cơ cấu chấp hành trong thực tế.

Như vậy, xét về mặt tín hiệu điều khiển, phương pháp đề xuất thể hiện ưu thế rõ rệt về tính ổn định và khả năng triển khai thực tế.

4.3.4. Đánh giá sai số vận tốc ảo

Trên Hình 5 mô tả kết quả mô phỏng sai số vận tốc ảo $e_v = v - v_d$.

Quan sát đồ thị Hình 5 nhận thấy đối với bộ điều khiển Adaptive Backstepping, sai số vận tốc ảo giảm nhanh về gần 0 trong thời gian ngắn và sau đó duy trì dao động rất nhỏ quanh giá trị cân bằng. Điều này chứng tỏ cấu trúc điều khiển hai tầng (kinematic-dynamic) hoạt động hiệu quả và đảm bảo tính ổn định của hệ thống.

Trong khi đó, bộ điều khiển PID xuất hiện sai số vận tốc dao động đáng kể với biên độ lớn và kéo dài theo thời gian. Điều này phản ánh việc PID không thể đảm bảo bám theo tín hiệu vận tốc mong muốn một cách chính xác trong điều kiện tồn tại phi tuyến và nhiễu.

Kết quả này làm rõ ưu điểm quan trọng của phương pháp Backstepping trong việc thiết kế điều khiển dựa trên cấu trúc hệ thống và đảm bảo hội tụ của các biến trạng thái trung gian.

4.3.5. Đánh giá định lượng qua chỉ số RMSE

Để đánh giá định lượng hiệu quả bám quỹ đạo của

bộ điều khiển đề xuất, chỉ số sai số căn bậc hai trung bình (Root Mean Square Error - RMSE) được sử dụng như một thước đo tổng hợp mức độ sai lệch giữa quỹ đạo thực và quỹ đạo tham chiếu.

RMSE được định nghĩa như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{e}(i) \|^2} \quad (31)$$

Trong đó n là số mẫu mô phỏng, và $\mathbf{e}(i)$ là vector sai số bám quỹ đạo tại thời điểm i , được xác định bởi:

$$\mathbf{e}(i) = \boldsymbol{\eta}(i) - \boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}(i) \quad (32)$$

Với $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ là trạng thái thực của tàu và $\boldsymbol{\eta}_{\text{ref}}$ là quỹ đạo tham chiếu.

Trên biểu đồ Hình 6 mô tả kết quả đánh giá định lượng qua chỉ số RMSE.

Quan sát kết quả biểu đồ Hình 6 cho thấy:

- Đồ thị RMSE cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai phương pháp điều khiển. Cụ thể, bộ điều khiển Adaptive Backstepping đạt giá trị khoảng 1,8m, trong khi bộ điều khiển PID đạt khoảng 6,8-7,0 (m).

Kết quả này cho thấy sai số trung bình của phương pháp đề xuất giảm đáng kể, với mức cải thiện ước tính trên 70% so với PID. Điều này phản ánh khả năng của Adaptive Backstepping trong việc xử lý hiệu quả tính phi tuyến, nhiễu và bất định của hệ thống.

- Ngược lại, bộ điều khiển PID không thích nghi tốt với sự thay đổi của hệ, dẫn đến sai số tích lũy lớn hơn.

Qua đó, chỉ số RMSE đã khẳng định rõ ưu thế của phương pháp đề xuất về độ chính xác bám quỹ đạo.

4.4. Nhận xét chung từ kết quả mô phỏng

Từ các kết quả mô phỏng có được, cho thấy bộ điều khiển Adaptive Backstepping thể hiện ưu thế rõ rệt so với bộ điều khiển PID truyền thống trên nhiều khía cạnh như sau:

Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo nâng cao độ chính xác bám quỹ đạo, sai lệch trên các trục luôn được giữ ở mức thấp và hội tụ nhanh chóng. Đồng thời, tín hiệu điều khiển trơn tru, biến thiên liên tục và ít dao động hơn, góp phần nâng cao tính khả thi trong triển khai thực tế.

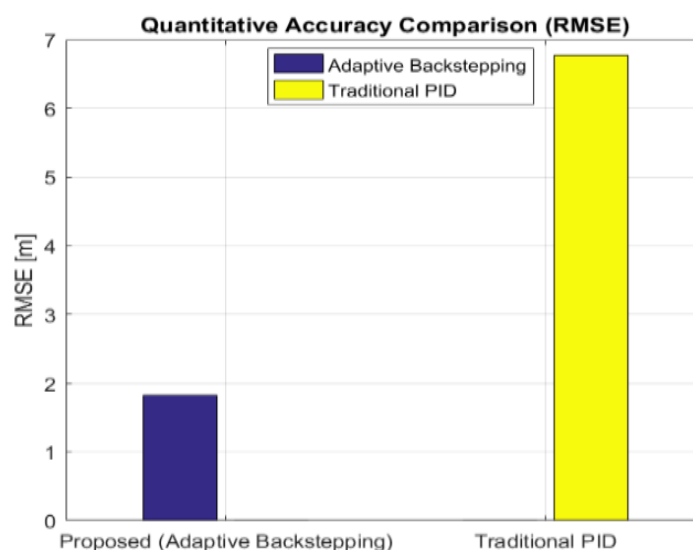
Bên cạnh đó, sai số vận tốc ảo giảm nhanh về lân cận 0, điều này phản ánh hiệu quả của cấu trúc điều khiển hai tầng trong phương pháp Backstepping.

Kết quả đánh giá định lượng thông qua chỉ số RMSE cũng cho thấy mức cải thiện đáng kể về độ chính xác so với PID.

5. Kết luận và hướng nghiên cứu mở rộng

5.1. Kết luận

Bài báo này đã nghiên cứu, đề xuất, xây dựng phương pháp điều khiển Adaptive Backstepping cho hệ tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành chuyển động bám quỹ đạo đặt trong điều kiện có nhiễu động từ môi trường và trong mô hình toán tồn tại các tham số bất định. Bằng cách sử dụng cấu trúc đệ quy hai tầng, phương pháp này đã kết hợp chặt chẽ giữa mô hình động học và động lực học, đồng thời tích hợp cơ chế



Hình 6. So sánh sai số RMSE giữa PID truyền thống và Backstepping thích nghi

thích nghi để bù các sai lệch từ tham số mô hình một cách hiệu quả.

Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển đề xuất không chỉ nâng cao chất lượng điều khiển cho các hệ phi tuyến phức tạp mà còn khẳng định được tính ổn định bền vững của hệ kín dựa trên phân tích lý thuyết Lyapunov. Đây là tiền đề quan trọng để ứng dụng vào thực tế điều khiển tàu thủy, đặc biệt là khi tàu hoạt động trong những hành trình khắc nghiệt với nhiều yếu tố biến động khó dự báo.

5.2. Hướng nghiên cứu mở rộng

Trong các nghiên cứu tiếp theo, hướng phát triển sẽ tập trung vào:

- Mở rộng đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển Adaptive Backstepping thông qua việc so sánh với các phương pháp điều khiển phi tuyến khác như Backstepping truyền thống, Sliding Mode Control (SMC) và các bộ điều khiển thích nghi hiện đại.

- Kết hợp phương pháp backstepping với các kỹ thuật học tăng cường.

- Nghiên cứu thực nghiệm trên mô hình Hardware-In-the-Loop (HIL)

- Triển khai thử nghiệm trên mô hình tàu thực để kiểm chứng khả năng áp dụng vào thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wang, Z., Qiu, C., Dong, Z., Cheng, S., Zheng, L. & Chen, S. (2025), *Trajectory Tracking of Unmanned Surface Vessels Based on Robust Neural Networks and Adaptive Control*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.13(7), p.1341.
Doi: 10.3390/jmse13071341.
- [2] Chen, Y.-H., Pan, S.-Y. & Chen, Y.-Y. (2025), *Trajectory Tracking Design of Autonomous Surface Vessels with Multiple Perturbations: A Robust Adaptive Fuzzy Approach*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.13(8), p.1419.
Doi: 10.3390/jmse13081419.
- [3] Deng, Z., Cui, J., Zhu, Z. et al. (2025), *Adaptive trajectory tracking control of underactuated ships using parameter prediction based neural network coordinated control*, Ocean Engineering, Vol.329, p.121188.
Doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121188.
- [4] Dong, Z., Lu, S., Hu, Z. et al. (2025), *Simultaneous modeling and backstepping control algorithm for trajectory tracking of underactuated USV based on real-time sailing data in complex ocean conditions*, ISA Transactions, Vol.166.
Doi: 10.1016/j.isatra.2025.07.013.
- [5] Wei, X., Song, X., Zhang, H., Hu, X. & Li, X. (2025), *Disturbance-observer-based tracking trajectory control of under-actuated surface vessel with input and output constraints*, Applied Mathematical Modelling, Vol.153, p.116598.
Doi: 10.1016/j.apm.2025.116598.
- [6] Liu, H., Zhuo, Z., Tian, X. & Mai, Q. (2025), *Practical Prescribed-time Trajectory Tracking Control for Underactuated Unmanned Surface Vessels With Asymmetric Prescribed Performance Constraints*, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.23(8), pp.2383-2398
Doi: 10.1007/s12555-025-0241-0.
- [7] Li, Y., Zhou, Y., Zhou, Y. & Chai, L. (2025), *Adaptive optimal tracking control for underactuated surface vessels using extended state observer and reinforcement learning*, Journal of Automation and Intelligence.
Doi: 10.1016/j.jai.2025.09.002.
- [8] Yu, S., Shi, G. & Zhu, G. (2025), *Adaptive neural predefined-time control for underactuated MSVs under input saturation: A definition-based approach*, Ocean Engineering, Vol.331, p.121328.
Doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121328.
- [9] Wang, Z., Chen, S., Fang, S. & Dong, Z. (2025), *Trajectory tracking of USV with disturbance observer and predictive compensator under network attacks and network delays*, Transactions of the Institute of Measurement and Control.
Doi: 10.1177/01423312251391382.
- [10] Dong, C., Zheng, B. & Chen, L. (2024), *Trajectory tracking control for uncertain underactuated surface vessels with guaranteed prescribed performance under stochastic disturbances*, Nonlinear Dynamics, Vol.112, pp.13215-13231.
Doi: 10.1007/s11071-024-09716-3.
- [11] Dong, S., Shen, Z., Zhou, L. & Yu, H. (2023), *Event-triggered Trajectory Tracking Control of Marine Surface Vessels With Time-varying Output Constraints Using Barrier Functions*, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.21, pp.2708-27173.

- Doi: 10.1007/s12555-022-0072-1.
- [12] Liu, H., Huang, X., Mai, Q. & Tian, X. (2023), *Fixed-time self-structuring neural network fault-tolerant tracking control of underactuated surface vessels with state constraints*, Ocean Engineering, Vol.279, p.114599.
 Doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114599.
- [13] Fossen, T. I. & Aguiar, A. P. (2024), *A Uniform Semiglobal Exponential Stable Adaptive Line-of-Sight (ALOS) Guidance Law for 3-D Path Following*, Automatica, Vol.163, p.111556.
 Doi: 10.1016/j.automatica.2024.111556
- [14] Fossen, T. I. (2023), *An Adaptive Line-of-Sight (ALOS) Guidance Law for Path Following of Aircraft and Marine Craft*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.31(6), pp.2887-2894.
 Doi: 10.1109/TCST.2023.3259819.
- [15] Fossen, T. I. (2022), *Line-of-sight Path-following Control utilizing an Extended Kalman Filter for Estimation of Speed and Course over Ground from GNSS Positions*, Journal of Marine Science and Technology, Vol.27, pp.806-813.
 Doi: 10.1007/s00773-022-00872-y.
- [16] Fossen, T. I. (2002), *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*, Trondheim, Norway: Marine Cybernetics.
- [17] Do, K. D. & Pan, J. (2009), *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*, Spring Science & Business Media.
 Doi: 10.1007/978-1-84882-730-1.

Ngày nhận bài:	21/04/2026
Ngày nhận bản sửa:	25/05/2026
Ngày duyệt đăng:	06/06/2026