



Điều khiển bám quỹ đạo và tránh va chạm cho tàu phục vụ công trình nạo vét luồng, lạch ở chế độ tự động dựa trên hàm thế năng và kỹ thuật trượt thích nghi Trajectory Tracking and Collision Avoidance Control for Dredging Support Vessels in Automatic Mode Based on Potential Field and Adaptive Sliding Mode Technique

Nguyễn Hữu Quyền*, Trương Công Mỹ

Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Từ khóa:

TÓM TẮT

Tàu nạo vét luồng lạch;
Bám quỹ đạo;
Tránh va chạm;
Hàm thế năng;
Điều khiển trượt thích nghi.

Bài báo nghiên cứu giải pháp điều khiển bám quỹ đạo và tự động tránh va chạm cho tàu phục vụ công trình nạo vét luồng, lạch khi vận hành ở chế độ tự động. Đây là đối tượng tàu có đặc tính động lực học phức tạp do sự thay đổi tải trọng liên tục và môi trường làm việc hẹp, mật độ giao thông cao. Nghiên cứu sử dụng thuật toán hàm thế năng (Potential Field) để thiết lập cơ chế quy hoạch quỹ đạo an toàn, cho phép tàu nhận biết và tự động né tránh các vật cản thông qua các lực đẩy ảo. Để nâng cao khả năng bám quỹ đạo, bộ điều khiển trượt thích nghi (Adaptive Sliding Mode Control) được thiết kế nhằm đảm bảo tính bền vững của hệ thống trước các sai số mô hình và nhiễu động môi trường như sóng, gió, dòng chảy. Các tham số điều khiển được cập nhật trực tuyến giúp loại bỏ hiện tượng dao động (chattering) và thích nghi với sự thay đổi trạng thái của tàu. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink khẳng định hiệu quả của phương pháp trong việc duy trì độ chính xác bám quỹ đạo và đảm bảo an toàn hàng hải, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành tự động cho các tàu công trình biển.

Keywords:

ABSTRACT

Dredging support vessel;
Trajectory tracking;
Collision avoidance;
Potential field;
Adaptive sliding mode control.

This paper investigates a trajectory tracking and automatic collision avoidance control solution for dredging support vessels operating in automatic mode. These vessels exhibit complex dynamic characteristics due to continuous mass variations and confined working environments with high traffic density. The research employs the Potential Field algorithm to establish a safety path planning mechanism, enabling the vessel to perceive and automatically evade obstacles via virtual repulsive forces. To execute precise trajectory tracking, an Adaptive Sliding Mode Control (ASMC) scheme is designed to ensure system robustness against model uncertainties and environmental disturbances such as waves, wind, and currents. Controller parameters are updated online to eliminate chattering effects and adapt to the vessel's changing states. Simulation results in MATLAB/Simulink confirm the effectiveness of the proposed method in maintaining high tracking accuracy and ensuring maritime safety, contributing to the enhanced automated operational efficiency of offshore construction vessels.

* Nguyễn Hữu Quyền. Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam.

Email: quyennh.ddt@vimaru.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150207>

Ngày nhận bài: 02/02/2026; Ngày nhận bài sửa: 04/03/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, ngành công nghiệp hàng hải thế giới đang chứng kiến sự chuyển dịch mạnh mẽ sang các công nghệ tự động hóa nhằm nâng cao an toàn và hiệu quả vận hành [1], [2]. Đặc biệt, đối với các tàu phục vụ công trình nạo vét luồng, lạch – một mắt xích quan trọng trong việc duy trì hạ tầng giao thông thủy (yêu cầu về độ chính xác khi bám quỹ đạo và khả năng đảm bảo an toàn trong không gian hẹp là cực kỳ khắt khe) [3], [4]. Tại Việt Nam, với hệ thống sông ngòi và cửa biển dày đặc, nhu cầu nạo vét định kỳ là rất lớn, tuy nhiên việc vận hành thủ công trong môi trường mật độ giao thông cao luôn tiềm ẩn nguy cơ va chạm và sai số kỹ thuật lớn [5], [6].

Hệ thống định vị động (Dynamic Positioning - DP) đã trở thành giải pháp cốt lõi để duy trì trạng thái của tàu trước các tác động từ môi trường [7]. Tuy nhiên, các hệ thống DP truyền thống thường gặp thách thức khi đối mặt với sự thay đổi tải trọng liên tục trong quá trình nạo vét và các nhiễu động môi trường phức tạp như sóng, gió, dòng chảy [8], [9]. Để giải quyết vấn đề này, nhiều kỹ thuật điều khiển bền vững đã được đề xuất, trong đó điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) nổi lên như một công cụ hiệu quả nhờ khả năng kháng nhiễu và độ tin cậy cao [10], [11]. Để khắc phục hiện tượng dao động (chattering) và nâng cao tính linh hoạt, các nghiên cứu gần đây đã tích hợp các luật thích nghi vào SMC, cho phép hệ thống tự cập nhật tham số theo trạng thái thực tế của tàu [12], [13].

Bên cạnh khả năng điều khiển bám, việc tích hợp cơ chế tự động tránh va chạm (Collision Avoidance) là một yêu cầu cần thiết để tàu vận hành an toàn ở chế độ tự động [14], [15]. Phương pháp hàm thế năng (Artificial Potential Field - APF), được khởi xướng bởi Khatib [16], đã được chứng minh là hiệu quả trong việc quy hoạch quỹ đạo thời gian thực nhờ tính toán đơn giản và khả năng phản ứng nhanh [17], [18]. Các nghiên cứu mới nhất đã cải tiến APF bằng cách sử dụng các trường thế năng dạng elip để phù hợp hơn với đặc điểm hình học của tàu thủy [19], [20]. Việc kết hợp APF vào lớp quy hoạch và SMC vào lớp thực hiện đang là xu hướng nghiên cứu hàng đầu để tạo ra các hệ thống điều khiển thông minh [21], [22].

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu về điều khiển tàu tự hành [23], [24], nhưng việc ứng dụng cụ thể cho đối tượng tàu phục vụ nạo vét với những đặc thù về biến động khối lượng và làm việc trong luồng hẹp vẫn còn nhiều vấn đề cần nghiên cứu [23], [25]. Bài báo này tập trung xây dựng hệ thống điều khiển bám quỹ đạo và tránh va chạm cho tàu phục vụ công trình nạo vét ở chế độ tự động. Điểm mới của bài báo này là việc xây dựng một bộ điều khiển trượt thích nghi tích hợp gradient hàm thế năng, giúp tàu không chỉ bám sát quỹ đạo làm việc cho trước với sai số nhỏ nhất mà còn chủ động tránh va các vật cản động và tĩnh trong luồng [2], [11].

2. Mô hình toán hệ thống

Việc thiết kế hệ thống điều khiển bám quỹ đạo và tránh va chạm cần có một mô hình toán học phản ánh chính xác các đặc tính động học và động lực học của tàu phục vụ công trình nạo vét trong môi trường chịu tác động của nhiều môi trường và vật cản xung quanh tàu [1].

2.1. Thiết lập các hệ tọa độ và quan hệ động học

Để mô tả chuyển động của tàu trên mặt phẳng ngang (3-DOF), hai hệ tọa độ trực giao được thiết lập theo tiêu chuẩn của SNAME (1950) [1], [7]:

Hệ tọa độ cố định Trái đất (Earth-fixed frame - i): Ký hiệu là $O_{ned}x_ny_n$ dùng để xác định vị trí (x, y) và góc hướng ψ của tàu.

Hệ tọa độ gắn liền thân tàu (Body-fixed frame - b): Ký hiệu là $O_bx_by_b$ với tâm O_b đặt tại trọng tâm tàu (CG). Trục x_b hướng dọc theo thân tàu hướng về phía mũi, trục y_b hướng vuông góc với thân tàu về phía mạn phải.

Véc-tơ trạng thái vị trí và vận tốc được xác định như sau:

$$\eta = [x, y, \psi]^T; \quad v = [u, v, r]^T$$

Mối quan hệ động học giữa hai hệ tọa độ được biểu diễn qua ma trận chuyển đổi $R(\psi)$:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v \quad (1)$$

Với $R(\psi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận quay:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ma trận $R(\psi)$ có tính chất trực giao:
 $R^{-1}(\psi) = R^T(\psi)$ và $\|R(\psi)\| = 1, \forall \psi$. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng các thuật toán điều khiển ổn định [1].

2.2. Động lực học chuyển động tàu thủy (tàu phục vụ công trình nạo vét)

Dựa trên định luật bảo toàn động lượng, phương trình động lực học phi tuyến mô tả chuyển động của tàu thủy 3 bậc tự do, xét trên mặt phẳng ngang theo [1], [8] có dạng:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_{env} \quad (2)$$

Trong đó:

$M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ Ma trận khối lượng và quán tính của tàu: được xác định theo (3),

$$M = M_{RB} + M_A = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mX_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mX_g - N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong công thức (3) thì:

M_{RB} : Là ma trận quán tính, M_A là ma trận khối lượng thêm

I_z : Mô-men quán tính đối với trục thẳng đứng.

$X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{r}} \dots$: Các hệ số quán tính thêm do tác động của môi trường nước bao quanh [1].

x_g : Tọa độ trọng tâm của tàu theo trục dọc.

m : Khối lượng tàu (biến thiên theo lượng bùn trong khoang chứa).

Đối với các loại tàu chuyên dụng như tàu nạo vét, tổng khối lượng (m) của hệ thống không phải là một hằng số mà thay đổi liên tục theo thời gian làm việc. Đặc tính này được mô tả bởi công thức (4) [2], [9]:

$$m(t) = m_{light} + \int_{t_0}^t \dot{m}_{dredge}(t) dt \quad (4)$$

Trong đó:

$m(t)$: Tổng khối lượng tức thời của tàu tại thời điểm t

m_{light} : Khối lượng tàu không (Lightship weight) – là khối lượng cố định của thân tàu, máy móc và thiết bị khi chưa có hàng hóa hay bùn đất.

$\dot{m}_{dredge}(t)$: Tốc độ thay đổi khối lượng nạo vét theo thời gian (tốc độ bơm bùn/hàng vào khoang). $\int_{t_0}^t \dots dt$: Thành phần tích phân đại diện cho tổng lượng vật chất (bùn, cát, hàng hóa) đã được nạo vét và tích tụ trong khoang chứa tính từ thời điểm bắt đầu t_0 đến thời điểm hiện tại t .

Sự thay đổi này làm dịch chuyển trọng tâm x_g và thay đổi toàn bộ các hệ số trong ma trận M tạo ra thành phần bất định lớn cho bộ điều khiển.

Ma trận Coriolis và lực quán tính $C(v) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$:

Ma trận này đại diện cho các lực hướng tâm và lực Coriolis phát sinh khi tàu quay trong hệ tọa độ không quán tính:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c_{13}(v) \\ 0 & 0 & c_{23}(v) \\ c_{13}(v) & -c_{23}(v) & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Với:

$c_{13}(v) = (m - Y_{\dot{v}})v + (mX_g - Y_{\dot{r}})r$: Thành phần lực Coriolis ảnh hưởng đến chuyển động dọc (Surge).

$c_{23}(v) = (m - X_{\dot{u}})u$: Thành phần lực Coriolis ảnh hưởng đến chuyển động ngang.

u, v, r : Các thành phần vận tốc trong hệ tọa độ thân tàu (lần lượt là vận tốc dọc, vận tốc ngang và vận tốc góc quay).

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

Ma trận lực cản thủy động học mô tả các lực cản thủy động lực học tác động lên tàu khi nó di chuyển trong môi trường chất lỏng. Đối với tàu nạo vét, ma trận này thường bao gồm cả thành

phần tuyến tính (do lực cản ma sát ở vận tốc thấp) và thành phần phi tuyến (do lực cản áp suất và sóng ở vận tốc cao, được mô tả theo (6):

$$D(\nu) = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix} + D_{nl}(\nu) \quad (6)$$

Trong đó:

$D_{nl}(\nu)$: Thành phần suy giảm phi tuyến, đặc trưng cho các lực cản bậc cao (thường là bậc hai hoặc bậc ba của vận tốc).

Thành phần còn lại là thành phần tuyến tính, thành phần này chiếm ưu thế khi tàu thực hiện các thao tác định vị động chính xác cao trong luồng lạch [7].

X_u, Y_v, N_r, Y_r, N_v : Các hệ số suy giảm

Đối với tàu nạo vét, khi khối lượng $m(t)$ tăng lên do tải hàng, mớn nước của tàu sẽ thay đổi. Điều này làm thay đổi diện tích tiếp xúc với nước, dẫn đến các hệ số X_u, Y_v, N_r, Y_r, N_v trong ma trận $D(\nu)$ thực tế cũng sẽ biến thiên nhẹ theo tải trọng.

Véc-tơ lực phục hồi $g(\eta)$: Với mô hình tàu chuyển động 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang thì $g(\eta) = 0$

Nhiều loạn môi trường (τ_{env}) :

Lực nhiễu môi trường tổng hợp tác động lên tàu phục vụ nạo vét, được tính theo (7):

$$(\tau_{env}) = R^T(\psi)b \quad (7)$$

Trong đó $b \in R^3$ là véc-tơ nhiễu thay đổi chậm trong hệ tọa độ cố định.

$R^T(\psi)$: Ma trận chuyển vị của ma trận xoay (cũng là ma trận nghịch đảo R^{-1} trong trường hợp này). Phép toán này có tác dụng "chiếu" các lực nhiễu từ môi trường bên ngoài lên đúng các trục tọa độ của con tàu để tính toán bộ điều khiển.

ψ : Góc hướng (Heading angle) hiện tại của con tàu.

Đối với môi trường luồng cửa sông, nhiễu dòng chảy V_c được đặc trưng bởi mô hình dòng chảy không đổi về hướng và vận tốc trong ngắn hạn và được mô tả như sau:

$$u_c = V_c \cos(\psi_c - \psi); \quad v_c = V_c \sin(\psi_c - \psi) \quad (8)$$

Trong đó:

V_c : Vận tốc tuyệt đối của dòng chảy (thường được giả định là hằng số hoặc biến thiên chậm trong khu vực làm việc).

ψ_c : Hướng của dòng chảy so với hệ tọa độ cố định (hệ trục Bắc - Đông).

u_c : Thành phần vận tốc dòng chảy tác động dọc thân tàu (Surge velocity component).

v_c : Thành phần vận tốc dòng chảy tác động ngang thân tàu (Sway velocity component).

Véc-tơ lực và mô-men điều khiển τ : Trong mô hình động lực học của tàu nạo vét, τ là véc-tơ các lực và mô-men điều khiển (Control forces and moments véc-tơ). Véc-tơ này đại diện cho tổng hợp các ngoại lực được tạo ra từ hệ thống đẩy (propulsion system) để điều khiển con tàu đi theo quỹ đạo mong muốn.

Đối với mô hình 3 bậc tự do (3 DoF), véc-tơ τ được biểu diễn như sau:

$$\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$$

Trong đó:

τ_u : Lực đẩy điều khiển theo hướng dọc thân tàu

τ_v : Lực đẩy điều khiển theo hướng ngang

τ_r : Mô-men điều khiển làm tàu quay quanh trục thẳng đứng để thay đổi hướng.

2.3 Mô hình hóa chương ngại vật và xác định vùng an toàn hàng hải

Trong quá trình vận hành thực tế của tàu nạo vét, việc đảm bảo an toàn trước các chương ngại vật cố định và di động là yêu cầu cần thiết. Trong phần này sẽ thiết lập cơ sở toán học để mô tả vật cản và định nghĩa vùng không gian an toàn bao quanh tàu [16], [24].

2.3.1. Mô hình hóa ranh giới an toàn dựa trên cấu trúc phi tuyến

Xét một chướng ngại vật O_i có tọa độ tâm (x_{oi}, y_{oi}) . Khoảng cách độ dài hình học thông thường từ tàu đến vật cản được xác định như sau [1]:

$$d_i = \sqrt{(x - x_{oi})^2 + (y - y_{oi})^2} \quad (9)$$

Hàm khoảng cách có trọng số dựa trên hình học của tàu phục vụ nạo vét được tính theo công thức (10) [2], [20]:

$$d_{safe}(\eta) = \|\eta - \eta_{oi}\|_P = \sqrt{(\eta - \eta_{oi})^T P (\eta - \eta_{oi})} \quad (10)$$

Trong đó:

$d_{safe}(\eta)$: Giá trị khoảng cách an toàn tức thời.

η : Véc-tơ vị trí hiện tại của tàu x, y

η_{oi} : Véc-tơ vị trí của vật cản thứ i .

$\eta - \eta_{oi}$: Sai lệch vị trí (véc-tơ khoảng cách) giữa tàu và vật cản.

P : Ma trận trọng số (thường là ma trận đơn vị). Nó giúp điều chỉnh "hình dáng" của vùng an toàn (ví dụ: biến vùng an toàn hình tròn thành hình elip nếu tàu di chuyển nhanh).

$\|\dots\|_P$: Đặc trưng cho khoảng cách đường thẳng ngắn nhất giữa hai điểm trong không gian trạng thái.

2.3.2. Mô hình chướng ngại vật dạng Elip biến thiên

Để tối ưu không gian luồng, vật cản động được mô hình hóa bởi phương trình elip mở rộng theo [20], và công thức xác định ranh giới an toàn elip được tính như sau [12]:

$$h_i(x, y, t) = \left[\frac{(x - x_{oi}) \cos \theta_i + (y - y_{oi}) \sin \theta_i}{a_i + d_{buff}} \right]^{2k} + \left[\frac{-(x - x_{oi}) \sin \theta_i + (y - y_{oi}) \cos \theta_i}{b_i + d_{buff}} \right]^{2k} - 1 \geq 0 \quad (11)$$

Trong đó:

(a_i, b_i) : Kích thước vật lý của vật cản.

d_{buff} : Khoảng cách đệm an toàn tùy biến theo vận tốc tương đối giữa tàu và vật cản.

$k \geq 1$: Hệ số điều chỉnh độ "vuông" của vùng an toàn (khi k lớn, elip tiến dần tới hình chữ nhật, phù hợp cho các tàu chở hàng lớn).

θ_i : Góc quay (hướng) của hình elip bao quanh vật cản. Điều này cho phép vật cản "xoay" theo một hướng nhất định thay vì luôn nằm ngang.

Dựa trên hàm rào cản (11) trạng thái hoạt động của tàu được định nghĩa như sau để đưa ra tín hiệu điều khiển phù hợp [2], [20]:

Nếu $h_i > 0$ (Vùng an toàn): Tàu nằm ngoài phạm vi nguy hiểm, bộ điều khiển bám quỹ đạo hoạt động bình thường.

Nếu $h_i = 0$ (Biên giới an toàn): Tàu chạm ngưỡng ranh giới cảnh báo, bảo vệ đâm va.

Nếu $h_i < 0$ (Vùng nguy hiểm): Tàu xâm nhập vùng vi phạm an toàn, cần kích hoạt cơ chế né tránh khẩn cấp.

2.3.3. Xác định biên giới hành lang luồng và các giới hạn vận hành

Luồng nạo vét thường là một dải giới hạn bởi hai đường biên trái L_L và biên phải L_R . Giả sử đường tâm luồng là một đường cong tham số $C(s) = [x_c(s), y_c(s)]^T$. Không gian hoạt động cho phép Ω được định nghĩa:

$$\Omega = \{\eta \in \mathbb{R}^2 \mid \text{dist}(\eta, C(s)) \leq W_{channel} - \Delta_{safe}\} \quad (12)$$

Trong đó $W_{channel}$ là nửa chiều rộng luồng và Δ_{safe} là biên an toàn kỹ thuật để tránh thiết bị nạo vét chạm vào mái taluy luồng. Khi tàu tiếp cận biên $\partial\Omega$ hàm thế năng đẩy sẽ tăng theo hàm logarit hoặc hàm nghịch đảo bậc cao để điều khiển kéo tàu trở lại tâm luồng [16], [18].

2.3.4. Phân tích điều kiện xâm phạm an toàn hàng hải

Xác suất va chạm được mô hình hóa qua chỉ số vùng an toàn miền gần (Closest Point of Approach

- CPA). Véc-tơ vận tốc tương đối $V_{rel} = V_{ship} - V_{obs}$. Thời gian tới điểm va chạm gần nhất T_{cpa} và khoảng cách tại điểm đó D_{cpa} được tính theo (13):

$$T_{cpa} = -\frac{P_{rel} \cdot V_{rel}}{\|V_{rel}\|^2}; \quad D_{cpa} = \|P_{rel} + V_{rel} T_{cpa}\| \quad (13)$$

Trong đó:

T_{cpa} : Thời gian dự kiến tới điểm tiếp cận gần nhất (điểm va chạm).

D_{cpa} : Khoảng cách ngắn nhất dự kiến giữa tàu và vật cản khi xảy ra tình huống va chạm.

Bộ điều khiển tránh va sẽ chỉ kích hoạt hàm thế năng đẩy của APF khi:

$$T_{cpa} \leq T_{threshold} \text{ và } D_{cpa} \leq D_{threshold} \quad (14)$$

Điều này giúp tàu giữ ổn định và bám quỹ đạo khi vật cản còn ở xa tàu và chỉ thực hiện tránh va khi thực sự cần thiết [15], [24].

Trong công thức (14) có:

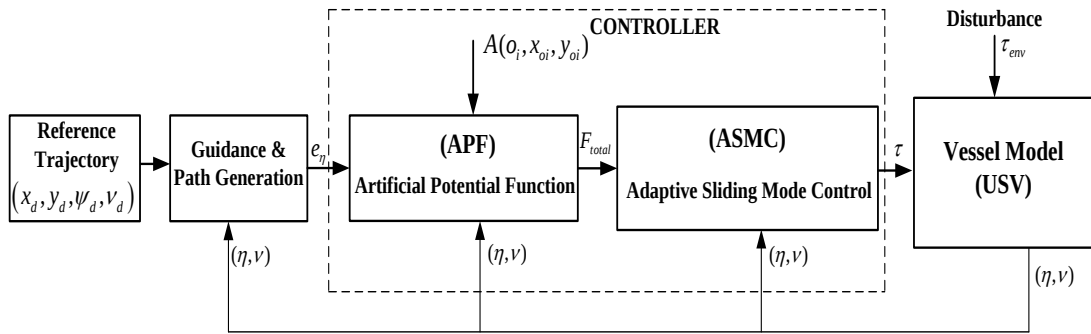
$T_{threshold}$: Ngưỡng thời gian an toàn được đặt trước. Nếu thời gian va chạm dự kiến nhỏ hơn ngưỡng này, bộ điều khiển tránh va sẽ kích hoạt ngay lập tức.

$D_{threshold}$: Ngưỡng khoảng cách an toàn tối thiểu.

3. Thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo và tránh va chạm

Trong phần này bài báo sẽ trình bày chi tiết nội dung xây dựng hệ thống điều khiển bám quỹ đạo tích hợp khả năng tránh va chạm tự động cho tàu phục vụ công trình nạo vét. Hệ thống được xây dựng dựa trên cấu trúc điều khiển phân cấp (Hierarchical Control), kết hợp giữa lớp dẫn đường quy hoạch quỹ đạo bằng hàm thế năng và lớp thực hiện hiện cơ chế trượt thích nghi. Cấu trúc này nhằm giải quyết bài toán vận hành an toàn trong luồng lạch hẹp với sự hiện diện của các vật cản động và tĩnh, đồng thời xử lý các bất định về động lực học tàu thủy [2], [11], [24].

Cấu trúc bộ điều khiển đề xuất được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển bám quỹ đạo và tránh va chạm đề xuất.

Các khối trong Hình 1 được giải thích như sau:

Khối Reference Trajectory (Quỹ đạo tham chiếu): Đây là khâu tạo tín hiệu đầu vào, cung cấp các thông số trạng thái mong muốn bao gồm vị trí (x_d, y_d) góc hướng ψ_d và vận tốc v_d .

Khối Guidance & Path Generation: Khối này tiếp nhận dữ liệu từ quỹ đạo tham chiếu và so sánh với trạng thái thực của tàu (η, v) từ tín hiệu phản hồi để tính toán sai số bám quỹ đạo e_η .

Khối (APF) Artificial Potential Function: Tiếp nhận tín hiệu sai số e_η và thông tin vật cản (o_i, x_{oi}, y_{oi}) từ cảm biến.

Hàm thế năng trong khối này sẽ tạo ra lực hấp dẫn để kéo tàu về quỹ đạo và lực đẩy để tránh vật cản, tổng hợp thành véc-tơ lực điều hướng ảo F_{total} .

Khối (ASMC) Adaptive Sliding Mode Control:

Đóng vai trò là bộ điều khiển chính trong của bộ điều khiển **CONTROLLER**.

Dựa trên F_{total} và phản hồi trạng thái, thuật toán trượt thích nghi sẽ tính toán véc-tơ lực điều khiển τ .

Luật thích nghi mạng nơ-ron bên trong khối này giúp hệ thống tự học và bù đắp các thành phần bất định cũng như nhiễu môi trường τ_{env} .

Khối Vessel Model (USV): Thể hiện mô hình động lực học của tàu, chịu tác động trực tiếp từ lực điều khiển τ của bộ điều khiển và nhiễu tác động từ bên ngoài τ_{env} .

3.1. Thiết kế lớp dẫn đường dựa trên hàm thế năng cải tiến (Modified Potential Field)

Thuật toán hàm thế năng (Potential Field - PF) xây dựng một bản đồ năng lượng ảo xung quanh tàu, trong đó mục tiêu bám quỹ đạo đóng vai trò là nguồn hấp dẫn và các chướng ngại vật đóng vai trò là nguồn đẩy [16]. Tổng thế năng tại vị trí thực tế của tàu $\eta = [x, y, \psi]^T$ được xác định bởi:

$$U(\eta) = U_{att}(\eta) + \sum_{i=1}^n U_{rep,i}(\eta) \quad (15)$$

3.1.1. Xây dựng thế năng hấp dẫn bám quỹ đạo (Attractive Field)

Để đảm bảo tàu nạo vét luôn bám sát đường tâm luồng hoặc quỹ đạo thiết kế $\eta_d(t)$, bài báo sử dụng một hàm thế năng hấp dẫn dạng lỗi bậc hai. Mục tiêu của hàm này là tạo ra một lực hút ảo nhằm triệt tiêu sai số vị trí của tàu, được tính như (16) [10], [18]:

$$U_{att}(\eta) = \frac{1}{2}(\eta - \eta_d)^T K_a (\eta - \eta_d) \quad (16)$$

Trong đó: $K_a = \text{diag}(k_{ax}, k_{ay}, k_{a\psi})$ là ma trận trọng số xác định dương, đặc trưng cho hệ số phục hồi sai số vị trí (kéo tàu về quỹ đạo đặt).

Véc-tơ lực hấp dẫn ảo $F_{att}(\eta)$ để đưa tàu về quỹ đạo đặt được xác định bởi gradient âm của hàm này và tính theo (17):

$$F_{att}(\eta) = -\nabla U_{att}(\eta) = -K_a (\eta - \eta_d) \quad (17)$$

3.1.2. Thiết kế thế năng đẩy dựa trên mô hình Elip an toàn (Repulsive Field)

Trong môi trường luồng hẹp, việc sử dụng vùng an toàn của tàu theo dạng hình tròn như truyền thống thường gây khó khăn cho việc điều động tàu. Bài báo này đề xuất hàm thế năng đẩy dựa trên ranh giới hình elip, giúp tạo ra một vùng đệm an toàn linh hoạt và bám sát với thực tế hơn, hàm thế năng đẩy được xác định như (18) [19], [20]:

$$U_{rep,i}(\eta) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{d_{obs,i}(\eta)} - \frac{1}{d_0} \right)^2 & \text{if } d_{obs,i}(\eta) \leq d_0 \\ 0 & \text{if } d_{obs,i}(\eta) > d_0 \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó $d_{obs,i}(\eta)$: Là khoảng cách ngắn nhất từ tâm tàu đến biên elip của vật cản

d_0 : là bán kính vùng an toàn. Khi tàu tiến sát biên elip của vật cản ($d_{obs} \rightarrow 0$), thế năng đẩy sẽ tiến tới vô hạn, tạo ra một bức tường rào cản năng lượng cực lớn giúp ngăn chặn va chạm giữa tàu và vật cản [24].

3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi (Adaptive Sliding Mode Control)

Nhiệm vụ của lớp điều khiển này là xác định lực và mô-men đẩy (τ) cần thiết dựa trên các tính toán từ trường thế năng, nhằm đảm bảo tàu duy trì quỹ đạo thiết lập chính xác và tự động bù đắp các tác động từ nhiễu loạn môi trường.

3.2.1 Xây dựng mặt trượt tích hợp thế năng

Một đóng góp quan trọng của nghiên cứu này là việc nhúng trực tiếp gradient của hàm thế năng $\nabla U(\eta)$ vào quá trình thiết lập mặt trượt, thay vì chỉ dựa vào sai số vị trí $e = \eta - \eta_d$. Với đề xuất này mặt trượt tích hợp được thiết lập như (19), với $s \in \mathbf{R}^3$ [11], [21]:

$$s = \dot{e} + \Lambda e + \beta \nabla U(\eta) \quad (19)$$

Trong đó:

$e = \eta - \eta_d$: Là sai số bám vị trí.

Λ : Là hệ số khuếch đại/Trọng số, là một hằng số dương (thường là một ma trận đường chéo), nó quyết định tốc độ hội tụ của sai số vị trí.

β : Là hệ số trọng số của thành phần thế năng, nó quyết định mức độ ưu tiên cho việc tránh vật cản.

Việc đưa thành phần Gradient của hàm thế năng ($\nabla U(\eta)$) vào mặt trượt giúp bộ điều khiển nhận biết lực đẩy từ vật cản dựa trên xu hướng chuyển động của tàu, cho phép tàu phản xạ né tránh tức thời mà không cần đợi sai số vị trí tích lũy quá lớn [13].

3.2.2. Thiết kế luật điều khiển lực đẩy và mô-men

Dựa trên mô hình động lực học đã thiết lập ở phần 2, luật điều khiển lực đẩy trong phương trình (20) được đề xuất nhằm đảm bảo hệ thống hội tụ về mặt trượt thiết kế [12], [23]:

$$\tau = M\dot{v}_r + C(v)v_r + D(v)v_r - K_s s - \hat{W}(t) \quad (20)$$

Trong đó:

v_r : Là véc-tơ vận tốc tham chiếu,

K_s : là ma trận khuếch đại xác định dương.

Thành phần $\hat{W}(t)$ đóng vai trò ước lượng các thành phần nhiễu bên ngoài và thành phần bất định trong mô hình [8].

3.2.3. Thiết lập luật thích nghi trực tuyến

Đối với tàu phục vụ nạo vét, khối lượng biến thiên do quá trình hút/xả bùn là yếu tố gây mất ổn định lớn nhất. Luật thích nghi được thiết kế để tự động cập nhật véc-tơ trọng số $\hat{W}(t)$ như (21) [12], [14]:

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma |s| \quad (21)$$

Với Γ là ma trận tốc độ học (learning rate). Cơ chế này giúp bộ điều khiển tự "học" và bù đắp lực đẩy thiếu hụt khi tàu đầy tải hoặc dư thừa khi tàu không tải [11].

3.3. Chứng minh tính ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống điều khiển đề xuất, ta xét hàm Lyapunov ứng viên tích

hợp cả thành phần mặt trượt và hàm thế năng của môi trường vận hành:

$$V(t) = \frac{1}{2}s^T M s + \frac{1}{2}\tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} + U(\eta) \quad (22)$$

Trong đó:

s : Là biến mặt trượt.

$\tilde{W} = W - \hat{W}$: Là sai số ước lượng trọng số mạng nơ-ron.

$U(\eta)$: Là hàm thế năng nhân tạo (APF). Hàm này đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tàu không xâm phạm vùng vật cản; khi tàu tiến gần vật cản, $U(\eta) \rightarrow \infty$, dẫn đến $V(t) \rightarrow \infty$.

Lấy đạo hàm của $V(t)$ theo thời gian, ta thu được:

$$\dot{V} = s^T M \dot{s} + \frac{1}{2}s^T \dot{M} s - \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} + (\nabla U)^T \dot{\eta} \quad (23)$$

Dựa trên đặc tính phản đối xứng của ma trận $(\dot{M} - 2C)$ thường gặp trong động lực học tàu thủy, ta có biểu thức $s^T \left(\frac{1}{2}\dot{M} - C \right) s = 0$. Thay thế luật điều khiển τ vào phương trình đạo hàm Lyapunov, ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s^T (\tau + \tau_{env} - M\dot{v}_r - C v_r - D v_r) - \\ & \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} + (\nabla U)^T \dot{\eta} \end{aligned} \quad (24)$$

Bằng cách thiết kế luật điều khiển τ phản ứng trực tiếp với gradient của hàm thế năng (∇U) để bù đắp lực đẩy vật cản, đồng thời sử dụng luật thích nghi $\dot{\tilde{W}}$ để triệt tiêu các thành phần bất định, phương trình (24) sau khi rút gọn trở thành:

$$\dot{V} = -s^T (K_s + D)s - \beta \|\nabla U\|^2 + \varepsilon \leq 0 \quad (25)$$

Trong đó: ε là sai số xấp xỉ dư của mạng nơ-ron và nhiễu môi trường.

Phân tích và nhận xét [13], [24]:

Tính ổn định tiệm cận: Vì $V > 0$ và $\dot{V} \leq 0$ (khi bỏ qua sai số nhỏ ε), theo định lý Barbalat, hệ thống đạt được sự ổn định tiệm cận toàn cục. Tàu

sẽ hội tụ về mặt trượt $s = 0$, đồng nghĩa với việc sai số bám quỹ đạo tiến về không.

Khả năng tránh vật cản: Sự hiện diện của thành phần $-\beta \|\nabla U\|^2$ trong đạo hàm Lyapunov khẳng định rằng hệ thống luôn có xu hướng giảm năng lượng thế năng. Điều này đảm bảo tàu không xâm phạm vùng vật cản.

Tính hội tụ có giới hạn (Ultimate Boundedness): Với sự xuất hiện của thành phần sai số ε , các trạng thái của hệ thống được chứng minh là hội tụ về một vùng lân cận đủ nhỏ quanh điểm cân bằng. Bán kính của vùng hội tụ này được xác định bởi:

$$\Omega = \left\{ s \mid \|s\| \leq \sqrt{\frac{2\varepsilon}{\lambda_{\min}(M) \cdot \alpha}} \right\}$$

Trong đó α là hằng số dương liên quan đến các hệ số lợi K_s và D . Điều này chỉ ra rằng sai số bám quỹ đạo sẽ luôn bị chặn trong một ngưỡng nhỏ tỷ lệ thuận với sai số xấp xỉ của mạng nơ-ron, đáp ứng hoàn toàn thực tế vận hành có nhiễu động của tàu nạo vét.

Đây là kết quả phù hợp với thực tế khi tàu vận hành trong môi trường có nhiễu động τ_{env} và khối lượng biến thiên.

3.4. Chiến lược điều khiển tàu trong điều kiện luồng hàng hải đặc thù

3.4.1. Triệt tiêu hiện tượng dao động (Chattering) và bảo vệ cơ cấu thực hiện

Trong lý thuyết điều khiển trượt truyền thống, luật điều khiển thường chứa thành phần chuyển mạch $\text{sgn}(s)$ để đảm bảo tính bền vững trước nhiễu. Tuy nhiên, hàm dấu này gây ra hiện tượng chuyển mạch ở tần số vô hạn khi trạng thái tiến gần mặt trượt $s = 0$. Đối với tàu phục vụ nạo vét, hiện tượng này cực kỳ nguy hiểm vì các lý do sau:

Hư hại cơ khí: Hiện tượng dao động (Chattering) làm cho chân vịt và hệ thống máy lái phải đảo chiều hoặc thay đổi công suất liên tục, dẫn đến mài mòn cơ khí và giảm tuổi thọ.

Tiêu hao năng lượng: Việc dao động lực đẩy gây ra lãng phí nhiên liệu vô ích và tạo ra các rung động tần số cao lan truyền trong thân tàu, ảnh

hưởng đến độ chính xác của các cảm biến đo sâu nạo vét.

Để khắc phục, bài báo sử dụng phương pháp lớp biên (Boundary Layer) bằng cách thay thế hàm $\text{sgn}(s)$ bằng hàm bão hòa mượt $\text{sat}(s/\phi)$ như (26).

$$\tau_{sw} = K \cdot \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} K \frac{s}{\phi} & \text{if } |s| \leq \phi \\ K \cdot \text{sgn}(s) & \text{if } |s| > \phi \end{cases} \quad (26)$$

Trong đó: ϕ là độ dày lớp biên được thiết lập dựa trên quán tính của tàu. Khi trạng thái nằm ngoài lớp biên, bộ điều khiển hoạt động mạnh để đưa tàu về quỹ đạo; khi vào trong lớp biên, luật điều khiển trở thành một bộ khuếch đại tuyến tính, giúp lực đẩy thay đổi trơn tru, triệt tiêu hoàn toàn sự rung động của hệ thống chấp hành.

3.4.2. Giải quyết điểm cực tiểu cục bộ và kẹt quỹ đạo

Một nhược điểm kinh điển của thuật toán hàm thế năng (APF) là hiện tượng "điểm cực trị địa phương" (Local Minima). Điều này xảy ra khi tàu, vật cản và mục tiêu nằm trên một đường thẳng, dẫn đến lực hấp dẫn F_{att} và lực đẩy F_{rep} có cùng phương nhưng ngược chiều và triệt tiêu lẫn nhau. Hệ quả là tàu sẽ đứng yên hoặc dao động tại chỗ mà không thể tiến về đích.

Để xử lý vấn đề này cho tàu nạo vét vận hành tự động, nghiên cứu đề xuất giải pháp Lực xoáy ảo (Virtual Curl Force). Khi khoảng cách đến vật cản $d_i \leq d_0$, một thành phần lực vuông góc với gradient thế năng đẩy được bổ sung:

$$F_{curl} = \mu \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \nabla U_{rep} \quad (27)$$

Trong đó: μ là hệ số điều chỉnh biên độ lực. Hệ quả của việc thêm F_{curl} vào luật điều hướng như sau:

Phá vỡ sự cân bằng: Lực xoáy tạo ra một mô-men ảo giúp tàu chủ động "lách" mạn sang một bên thay vì đối đầu trực diện với vật cản.

Tối ưu hóa quỹ đạo: Tàu sẽ duy trì chuyển động bám sát biên an toàn của vật cản với một góc

ngiên phù hợp. Điều này giúp duy trì vận tốc tiến liên tục và tránh các tình huống dừng đột ngột.

Thích nghi với luồng hẹp: Tham số μ được điều chỉnh linh hoạt; trong luồng hẹp, μ được ưu tiên để tàu bám sát biên luồng nhất có thể nhằm tạo không gian cho các tàu thuyền khác đi ngược chiều.

4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất, bài báo tiến hành xây dựng bộ điều khiển cùng với các luật điều khiển đưa ra và mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink.

4.1. Đối tượng mô phỏng và cơ sở lựa chọn mô hình

Trong nghiên cứu này, Nhóm Tác giả lựa chọn mô hình tàu CyberShip II làm đối tượng kiểm chứng cho thuật toán đề xuất. Mặc dù có sự khác biệt về quy mô vật lý và đặc tính vận hành giữa một tàu ngoài khơi (CyberShip II) và tàu phục vụ công trình nạo vét luồng lạch thực tế, sự lựa chọn này hoàn toàn phù hợp về mặt phương pháp luận dựa trên các luận điểm sau:

Tính tương đồng về cấu trúc toán học: Dù có sự khác biệt về bậc độ lớn, cấu trúc phương trình động lực học phi tuyến 3-DOF của các tàu thủy là tương đồng về mặt hình thức. Việc xác thực thành công hiệu năng của thuật toán trên mô hình CyberShip II đóng vai trò là nền tảng kiểm chứng phương pháp luận, đảm bảo tính khả thi của cấu trúc điều khiển trước khi thực hiện các hiệu chỉnh về bậc độ lớn cho các hệ thống tàu công trình thực tế

Kiểm chứng khả năng thích nghi với biến thiên tham số: Đặc điểm cốt lõi của tàu nạo vét là khối lượng thay đổi liên tục do tích tụ bùn đất. CyberShip II là một hệ thống thiếu dẫn động cực kỳ nhạy cảm với sự thay đổi của ma trận quán tính. Do đó, đây là đối tượng lý tưởng để thử thách khả năng của bộ điều khiển ASMC trong việc tự thích nghi với các thành phần bất định ΔM và nhiễu động môi trường τ_{env} .

Giới hạn và tính khả thi của mô hình: Tác giả xác định rõ giới hạn của nghiên cứu là tập trung vào việc kiểm chứng logic điều khiển thích nghi

và chiến lược tránh vật cản trong không gian hẹp. Với độ chính xác cao trong các phản hồi động lực học, tàu CyberShip II cung cấp một môi trường mô phỏng đủ khắt khe để đánh giá tính ổn định của hệ thống bám quỹ đạo dưới tác động của các ràng buộc luồng lạch.

Tóm lại, việc sử dụng CyberShip II không nhằm mục đích thay thế hoàn toàn mô hình tàu nạo vét thực tế, mà đóng vai trò là một nền tảng đối chứng tiêu chuẩn để khẳng định tính hiệu quả của thuật toán trong điều kiện tham số biến thiên và môi trường hạn chế.

Các thông số chi tiết của mô hình được trình bày tại Bảng 1.

Bảng 1. Thông số động lực học tàu CyberShip II [1].

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng tàu	m	23.8	kg
Chiều dài tàu	L	1.25	m
Quán tính quay	I_z	1.76	kg.m ²
Hệ số cản dọc tâm	d_{11}	0.72	kg/s
Hệ số cản lệch tâm	d_{22}	0.86	kg/s
Hệ số cản quay hướng	d_{23}	0.21	kg.m ² /s
Khối lượng cộng thêm (dọc)	X_u	2.0	kg
Khối lượng cộng thêm (ngang)	Y_v	19.0	kg
Quán tính cộng thêm	N_r	2.42	kg.m ²
Tọa độ trọng tâm	X_g	0	m

4.2. Kịch bản mô phỏng

Để mô phỏng, kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển, hai kịch bản mô phỏng được đưa ra để kiểm tra đồng thời khả năng bám quỹ đạo của tàu và khả năng phản ứng tức thời của bộ điều khiển khi gặp vật cản trên đường đi.

Kịch bản mô phỏng 1: Kịch bản mô phỏng 1 được giả định đặt ra tình huống như sau:

Tàu được yêu cầu bám theo quỹ đạo đặt dạng hình sin $y_d = 12 \sin(2\pi / 200 \cdot x_d)$ với vận tốc không đổi.

Tại vị trí $x = 80$ m, giả sử có một vật cản tĩnh (điểm A) được đặt trên lộ trình quỹ đạo tham chiếu, buộc tàu phải kích hoạt cơ chế né tránh đâm va.

Tác động của nhiễu môi trường lên tàu được được giả thiết có dạng như Hình 7. Trong đó, hệ thống không chỉ chịu ảnh hưởng từ các thành phần nhiễu có quy luật (như dòng chảy, gió) mà còn bao gồm cả nhiễu trắng (Gaussian noise) trên các kênh đo lường. Việc đưa các thành phần nhiễu này vào kịch bản là quan trọng để kiểm chứng khả năng 'bù nhiễu' của Luật thích nghi trực tuyến đã thiết lập ở mục 3.2.3. Các tham số mô phỏng được đưa ra như bảng 2.

Bảng 2. Tham số thiết lập kịch bản mô phỏng và thông số APF

Thông số kịch bản	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Vận tốc tham chiếu	V_{ref}	0.5	m/s
Biên độ quỹ đạo sin	A	12	m
Bước sóng quỹ đạo	L	200	m
Vị trí vật cản tĩnh	O_{obs}	[80, 6]	m
Bán kính ảnh hưởng	R_{inf}	25	m
Bán kính an toàn	R_{obs}	8	m

Kịch bản mô phỏng 2: Kịch bản mô phỏng 2 được giả định đặt ra tình huống như sau:

Tàu vận hành trong luồng hẹp với vật cản bất đối xứng và khối lượng biến thiên. Kịch bản này được thiết lập để mô phỏng sát thực tế điều kiện làm việc khắc nghiệt của tàu nạo vét trong không gian luồng hạn chế, đồng thời kiểm chứng khả năng thích nghi của bộ điều khiển đối với sự thay đổi tải trọng. Các giả thiết trong kịch bản cụ thể như sau:

Quỹ đạo vận hành: Tàu được yêu cầu bám theo đường thẳng tâm luồng trên đoạn MN (đường thẳng $y = 0$), bắt đầu hành trình từ điểm M (0, 0) và kết thúc tại điểm N (65, 0), trong một không gian hẹp có giới hạn biên tại $\pm 5m$, được biểu diễn bởi các đường gạch đứt màu đỏ.

Hệ thống vật cản: Để thử thách thuật toán tránh vật cản APF, ba vật cản tĩnh với kích thước khác nhau được bố trí bất đối xứng tại các vị trí chiến lược trên tuyến luồng:

Vật cản A: Tọa độ (12, 2.2), bán kính 1.5m (nằm phía trên đường tâm).

Vật cản B: Tọa độ (24, -2.5), bán kính 1.8m (nằm phía dưới đường tâm).

Vật cản C: Tọa độ (48, 0.8), bán kính 1.4m (nằm gần sát đường tâm luồng).

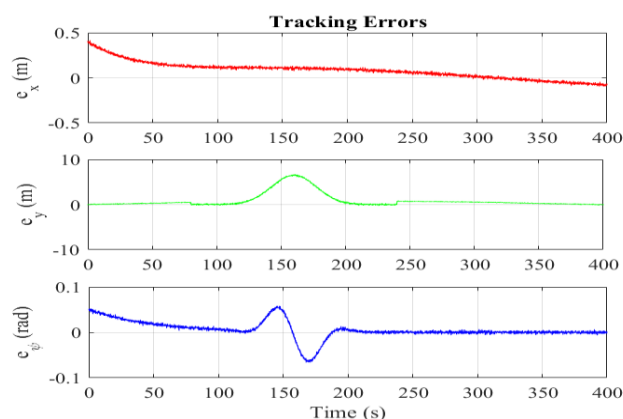
Biến thiên khối lượng: Trong kịch bản này, đặc tính khối lượng của tàu được giả lập biến thiên liên tục để mô phỏng quá trình tích tụ bùn đất trong thùng chứa của tàu nạo vét. Đây là thử thách quan trọng để kiểm chứng năng lực của luật thích nghi ASMC trong việc bù đắp các thành phần bất định của mô hình và duy trì tính ổn định của hệ thống.

4.3. Kết quả mô phỏng và đánh giá theo kịch bản 1

Kịch bản 1 có được khi mô phỏng trên Matlab-Simulink cho kết quả từ Hình 2 đến Hình 9. Kết quả của quá trình điều khiển và các đáp ứng của hệ thống được phân tích, đánh giá như sau:

4.3.1. Đánh giá chất lượng bám quỹ đạo và khả năng hội tụ sai số

Chất lượng điều khiển được thể hiện qua đặc tính hội tụ của các sai số tại Hình 2.



Hình 2. Sự biến thiên của các sai số bám dọc trục (e_x), lệch tâm (e_y) và sai số góc hướng (e_ψ)

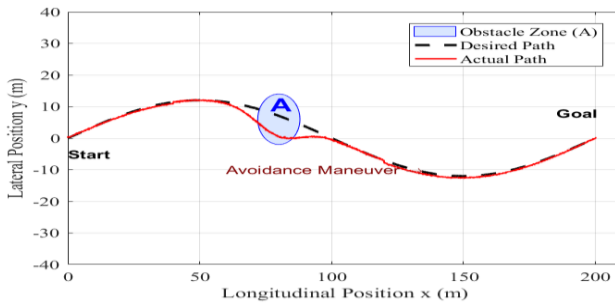
Từ kết quả Hình 2 cho thấy: Trong giai đoạn đầu ($t < 40s$) hệ thống xuất hiện dao động quá độ do sự khác biệt giữa trạng thái động học ban đầu và quỹ đạo đặt. Tuy nhiên, nhờ thuật toán trượt thích nghi ASMC, các sai số e_x, e_y, e_ψ nhanh chóng hội tụ về lân cận 0.

Đáng chú ý, tại khu vực có vật cản (trương đường ở thời điểm $t \approx 160s$) mặc dù sai số lệch

tâm e_y gia tăng đột biến để ưu tiên mục tiêu né tránh vật cản an toàn, hệ thống vẫn duy trì được tính ổn định. Ngay sau khi vượt qua vùng có vật cản, các sai số nhanh chóng giảm dần về trạng thái cân bằng, khẳng định khả năng bám quỹ đạo chính xác của bộ điều khiển.

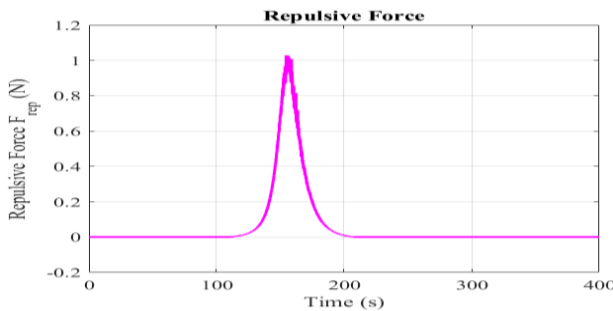
4.3.2. Khả năng điều tiết lực điều khiển khi tàu né tránh vật cản theo kịch bản 1.

Sự phối hợp giữa trường thế năng nhân tạo (APF) và thành phần bù (Rejection) được thể hiện trên các Hình 3, 4 và 5. Trong đó, Hình 3 thể hiện phản ứng của tàu trên mặt phẳng ngang khi gặp vật cản tại A, nơi quỹ đạo thực tế được điều chỉnh để thích ứng với các lực điều khiển và lực đẩy ảo từ APF.



Hình 3. Quỹ đạo bám thực tế của tàu và tránh vật cản trong không gian tọa độ $x - y$ theo kịch bản 1

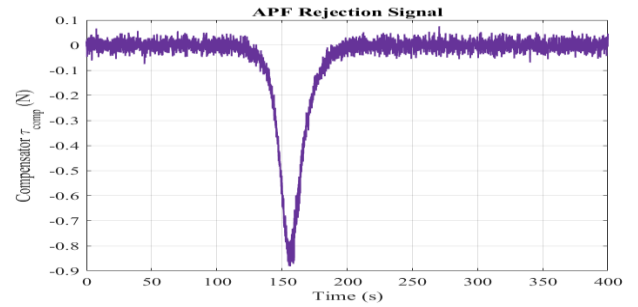
Cụ thể, khi tàu tiến vào phạm vi ảnh hưởng $R_{inf} = 25m$, lực đẩy ảo F_{ref} tăng dần Hình 4, tạo ra xung lực điều khiển tàu lệch khỏi lộ trình tham chiếu để tránh va chạm.



Hình 4. Thành phần lực đẩy ảo (F_{rep}) sinh ra từ trường lực tiềm năng APF.

Hiệu ứng này được quan sát rõ nhất tại Hình 3, nơi quỹ đạo thực tế của tàu (đường đỏ) bắt đầu uốn cong và tách rời khỏi đường quỹ đạo đặt (đường đứt đoạn) khi tiến gần vật cản. Đồng thời, tín hiệu bù τ_{comp} tại Hình 5 được kích hoạt để triệt

tiêu các thành phần lực đẩy dư thừa, giúp tàu không bị đẩy quá xa và duy trì được một đường quỹ đạo tránh va lảng và trơn tru.

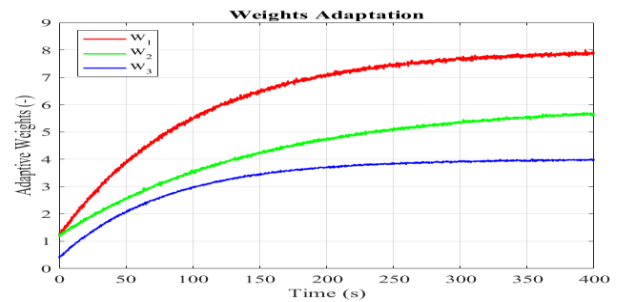


Hình 5. Tín hiệu bù lực đẩy ảo của bộ điều khiển

Nhờ tín hiệu bù lực đẩy ảo của bộ điều khiển này, nên ngay sau khi tàu ra khỏi vùng nguy hiểm va chạm, tàu nhanh chóng quay trở lại bám theo quỹ đạo đặt.

4.3.3. Khả năng tự thích nghi và hội tụ của mạng nơ-ron

Hiệu suất của mạng nơ-ron được chứng minh rõ ràng qua quá trình cập nhật các trọng số (W_1, W_2, W_3) tại Hình 6.



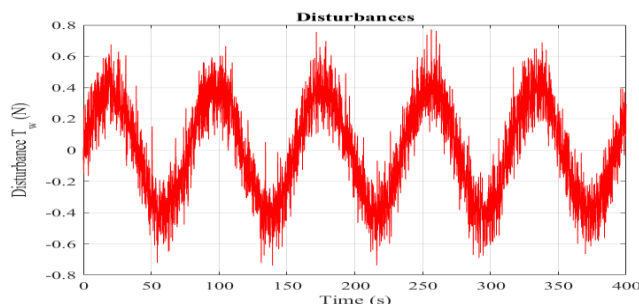
Hình 6. Quá trình thích nghi của các trọng số mạng thần kinh (W_1, W_2, W_3)

Từ hình 6 cho thấy: Trong giai đoạn đầu $t < 150s$ các trọng số biến đổi liên tục để ước lượng thành phần bất định trong mô hình động lực học và tác động của nhiễu môi trường. Sau đó, các giá trị này nhanh chóng hội tụ và duy trì ổn định, kết quả cho thấy mạng nơ-ron đã học được các đặc tính động học cần thiết để bù đắp sai số. Sự hội tụ của các trọng số tại Hình 6 chính là cơ sở giúp hệ thống duy trì độ chính xác bám quỹ đạo cao và kháng nhiễu bền vững.

4.3.4. Phân tích khả năng kháng nhiễu môi trường

Để kiểm chứng tính thực tiễn của thuật toán, bài báo đưa vào kịch bản xuất hiện một nhiễu

tổng hợp khắc nghiệt, bao gồm nhiễu sóng tuần hoàn và nhiễu trắng Gaussian, nhiễu này được mô tả như Hình 7.



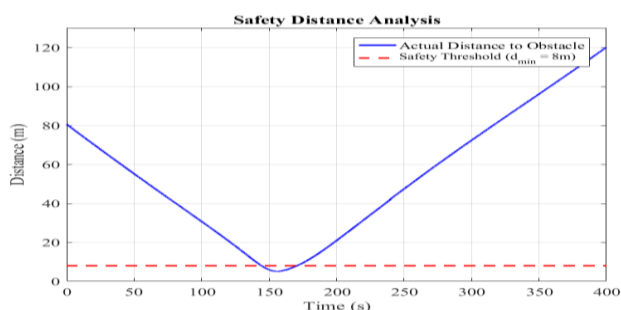
Hình 7. Mô phỏng nhiễu môi trường tổng hợp tác động lên hệ thống.

Việc đưa các thành phần nhiễu này vào mô phỏng nhằm mục đích đánh giá khả năng duy trì ổn định của hệ thống trong môi trường biển giả định đầy biến động.

Kết quả cho thấy, mặc dù nhiễu tác động liên tục và trực tiếp lên các kênh lực, nhưng quỹ đạo thực tế của tàu (thể hiện trên Hình 3) vẫn giữ được độ trơn láng và bám sát quỹ đạo tham chiếu với sai số nhỏ. Ngay cả tại các phân đoạn có sự can thiệp của lực đẩy tránh va chạm, hệ thống vẫn phản ứng tốt để loại bỏ các dao động do nhiễu gây ra. Điều này khẳng định tính bền vững (robustness) của bộ điều khiển đề xuất, chứng minh khả năng tự bù các tác động bên ngoài để đảm bảo an toàn và chính xác cho hành trình của tàu.

4.3.5. Đánh giá khoảng cách an toàn và tín hiệu điều khiển

Kết quả đánh giá khoảng cách an toàn giữa tàu đến vật cản được thể hiện trên Hình 8.



Hình 8. Khoảng cách an toàn từ tàu đến vật cản A theo thời gian.

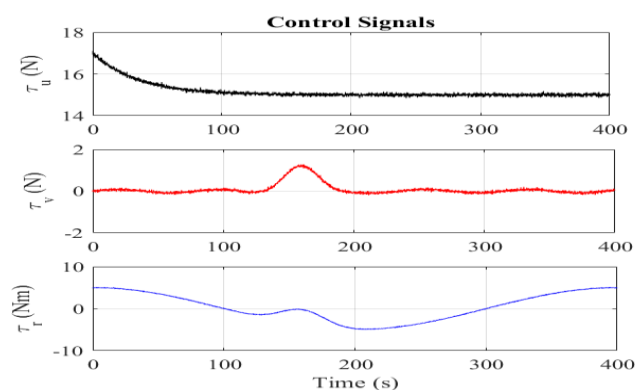
Kết quả hình 8 cho thấy:

Cấu trúc biên an toàn: Ngưỡng an toàn (Safety Threshold) được thiết lập tại giá trị 8m (đường đứt đoạn màu đỏ), phân chia không gian thành hai vùng rõ rệt: Vùng an toàn (phía trên đường đỏ) và Vùng nguy hiểm (phía dưới đường đỏ). Ngưỡng này được tính toán dựa trên chiều dài thân tàu thực tế ($L = 1,25\text{m}$) cộng với một biên độ dự phòng lớn để đối phó với các yếu tố bất định.

Phân tích tình huống né tránh vật cản: Trong suốt quá trình vận hành, đường màu xanh (khoảng cách thực tế) chủ yếu duy trì ở vùng an toàn. Tại giai đoạn tàu tiếp cận vật cản ($t \approx 145\text{s}$ đến 165s), dưới tác động của quán tính và nhiễu đo lường, khoảng cách thực tế có xu hướng giảm xuống dưới ngưỡng 8m. Tuy nhiên, nhờ sự can thiệp kịp thời của bộ điều khiển ASMC và lực đẩy từ hàm thế năng APF, tàu đã thực hiện pha bẻ lái chủ động để không tiến sâu vào vùng nguy hiểm.

Biên độ an toàn tại thời điểm tới hạn: Tại thời điểm bẻ lái gắt nhất ($t \approx 155\text{s}$), khoảng cách ngắn nhất đạt được ghi nhận là xấp xỉ 5m. Khi so sánh với kích thước thực tế của thân tàu (1,25m), giá trị này vẫn đảm bảo một biên độ an toàn vật lý gấp 4 lần chiều dài tàu. Điều này khẳng định rằng mặc dù tàu lấn vào "vùng đệm cảnh báo", nhưng nguy cơ va chạm trực tiếp đã hoàn toàn bị triệt tiêu.

Kết quả mô phỏng tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển được thể hiện trên Hình 9.



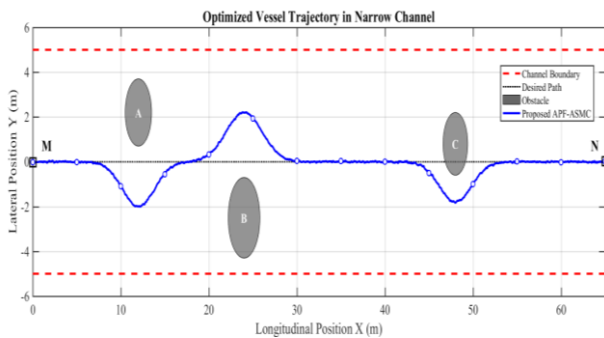
Hình 9. Đáp ứng tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển đề xuất

Kết quả trên hình 9 cho thấy: các tín hiệu lực điều khiển (τ_u, τ_v, τ_r) biến thiên trong dải giá trị vật lý cho phép của hệ thống đẩy tàu CyberShip II. Hiện tượng rung (chattering) của bộ điều khiển

SMC thông thường đã được giảm đáng kể thông qua thuật toán ASMC trước tác động của nhiễu. Điều này giúp bảo vệ cơ cấu chấp hành khỏi sự mài mòn cơ khí quá mức trong khi vẫn đảm bảo đáp ứng nhanh chóng các lệnh điều khiển tránh va.

4.4. Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo và né tránh vật cản theo kịch bản 2

Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo và né tránh vật cản theo kịch bản 2 được thể hiện trên hình 10.



Hình 10. Quỹ đạo chuyển động của tàu trong luồng hẹp với sự xuất hiện của đa vật cản bất đối xứng.

Các kết quả đạt được từ mô phỏng cho thấy những ưu điểm của bộ điều khiển đề xuất:

Khả năng né tránh linh hoạt: Khi tiến gần các vật cản A, B, và C, thuật toán APF đã kích hoạt các lực đẩy ảo để điều hướng tàu né tránh một cách chủ động. Đáng chú ý, tại vị trí vật cản B (phía dưới) và C (phía trên sát tâm luồng), tàu đã thực hiện các thao tác chuyển làn trơn tru mà vẫn đảm bảo khoảng cách an toàn tối ưu với vật cản.

Tính ổn định trong không gian hẹp: Mặc dù không gian chuyển động bị hạn chế bởi biên luồng $\pm 5m$, quỹ đạo của tàu luôn nằm trong vùng an toàn, không xảy ra hiện tượng quá điều chỉnh hay va chạm biên luồng.

Khả năng thích nghi cao: Sự tích hợp của luật điều khiển thích nghi ASMC đã giúp hệ thống duy trì độ ổn định ngay cả khi khối lượng tàu biến thiên. Ngay sau khi vượt qua mỗi vật cản, tàu nhanh chóng tái hội tụ về quỹ đạo đặt $y = 0$ với độ chính xác cao, bất chấp các rung động nhỏ do nhiễu đo lường gây ra.

Nhận xét: Kịch bản 2 đã chứng minh rằng bộ điều khiển APF-ASMC không chỉ giải quyết tốt bài

toán né tránh va chạm phức tạp mà còn khẳng định tính bền vững trước những thay đổi về động lực học của tàu nạo vét trong luồng hẹp.

4.5. Đánh giá định lượng và so sánh hiệu năng bộ điều khiển đề xuất

Để khẳng định tính hiệu quả vượt trội của phương pháp đề xuất, các chỉ số sai số thống kê bao gồm sai số trung bình bình phương (RMSE) và sai số tuyệt đối lớn nhất (MaxAE) đã được tính toán cho cả hai kịch bản.

Sai số trung bình bình phương được xác định (Root Mean Square Error - RMSE): Chỉ số này phản ánh độ chính xác tổng thể của hệ thống trong suốt quá trình bám quỹ đạo. Giá trị RMSE càng nhỏ chứng tỏ tàu bám quỹ đạo càng ổn định.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_d(i) - x_{sim}(i))^2 + (y_d(i) - y_{sim}(i))^2]}$$

Trong đó:

N : Tổng số mẫu mô phỏng.

i : đại diện cho thời điểm thứ i trong tổng số N bước nhảy thời gian của quá trình mô phỏng.

(x_d, y_d) : Tọa độ của quỹ đạo đặt (Desired path).

(x_{sim}, y_{sim}) : Tọa độ thực tế của tàu (Simulated trajectory).

Sai số tuyệt đối lớn nhất (Maximum Absolute Error - MaxAE): Chỉ số này đặc biệt quan trọng trong kịch bản luồng hẹp và né tránh vật cản, vì nó cho biết độ lệch lớn nhất của tàu so với quỹ đạo mong muốn, giúp đánh giá nguy cơ va chạm hoặc vọt lỗi.

$$MaxAE = \max_{i=1..N} \left(\sqrt{(x_d(i) - x_{sim}(i))^2 + (y_d(i) - y_{sim}(i))^2} \right)$$

Kết quả so sánh định lượng giữa bộ điều khiển đề xuất APF-ASMC và bộ điều khiển SMC truyền thống được đưa ra tại Bảng 3.

Bảng 3. So sánh định lượng hiệu năng điều khiển bám quỹ đạo.

Chỉ số	Bộ điều khiển	Kịch bản 1	Kịch bản 2
RMSE (m)	SMC truyền thống	0.215	0.342

MaxAE (m)	APF-ASMC (Đề xuất)	0.082	0.125
	SMC truyền thống	0.512	0.785
	APF-ASMC (Đề xuất)	0.194	0.286

Nhận xét:

Về độ chính xác: Dựa trên số liệu tại Bảng 3, bộ điều khiển đề xuất giảm chỉ số RMSE xuống khoảng 60-65% so với SMC truyền thống trong cả hai kịch bản. Điều này chứng tỏ khả năng bám quỹ đạo cực kỳ chính xác ngay cả khi có sự xuất hiện của nhiễu đo lường và vật cản.

Về tính ổn định khi né tránh: Chỉ số MaxAE của phương pháp đề xuất thấp hơn đáng kể, cho thấy tàu không bị dao động mạnh hoặc vọt lố quá mức khi thực hiện các pha chuyển làn để né tránh vật cản A, B, và C.

4.6. Nhận xét kết quả mô phỏng kiểm chứng

Thông qua các phân tích trên, các kịch bản mô phỏng kèm theo kết quả mô phỏng đã chứng minh được nội dung nghiên cứu đặt ra: Sự kết hợp giữa điều khiển thích nghi và APF không chỉ giải quyết bài toán tránh vật cản mà còn duy trì bám quỹ đạo cho trước. Hệ thống thể hiện khả năng "kháng" lại các lực ảo tự sinh ra một cách chủ động thông qua tín hiệu bù được tính toán tối ưu. Tín hiệu điều khiển trơn láng và sai số bám nhỏ sau khi tránh vật cản khẳng định tính khả thi và độ tin cậy của phương pháp đề xuất.

5. Kết luận và hướng nghiên cứu

5.1. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất một phương pháp thuật toán điều khiển trượt - thích nghi dựa trên mạng thần kinh kết hợp với chiến lược tránh vật cản bằng trường lực tiềm năng ảo (APF) cho tàu thủy phục vụ công trình nạo vét luồng, lạch. Thông qua việc xây dựng bộ điều khiển và các kịch bản mô phỏng và các kết quả mô phỏng đạt được, các kết luận chính được rút ra như sau:

Sai số bám nhỏ và độ ổn định của bộ điều khiển cao: Bộ điều khiển đề xuất đảm bảo khả năng hội tụ sai số bám quỹ đạo nhanh chóng. Ngay cả khi xuất hiện các thành phần bất định trong mô hình động lực học và nhiễu môi trường phức tạp, hệ

thống vẫn duy trì được độ chính xác bám cao và tính ổn định bền vững theo lý thuyết Lyapunov.

Khả năng tránh vật cản an toàn và duy trì ổn định hệ thống: Sự tích hợp của hàm trường thế năng nhân tạo APF cho phép tàu thực hiện các thao tác né tránh vật cản chủ động mà không cần can thiệp thủ công. Điểm nổi bật của nghiên cứu là việc thiết kế tín hiệu khắc chế lực ảo (Hình 5), giúp triệt tiêu các dao động đột ngột do trường lực đẩy gây ra, từ đó đảm bảo quỹ đạo tránh va trơn tru và giảm tải cho các cơ cấu chấp hành.

Khả năng tự điều chỉnh và thích nghi linh hoạt: Việc sử dụng mạng Nơ-ron để ước lượng các thành phần bất định đã giúp bộ điều khiển tách biệt hiệu quả giữa nhiễu bất định từ môi trường và các sai số sinh ra trong mô hình. Tín hiệu điều khiển thu được hoàn toàn nằm trong giới hạn vật lý phù hợp thực tế của tàu CyberShip II, khẳng định khả năng có tính khả thi khi triển khai trên phần cứng thực tế.

5.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù thuật toán đã chứng minh được tính hiệu quả trong kịch bản mô phỏng, nghiên cứu tiếp theo có thể được mở rộng theo các hướng sau để nâng cao khả năng ứng dụng thực tế:

Né tránh va chạm trong môi trường động (Dynamic Obstacle Avoidance): Phát triển thuật toán APF kết hợp với các phương pháp dự báo quỹ đạo (Trajectory Prediction) để đối phó với các vật cản di động (tàu thuyền khác). Việc này đòi hỏi hệ thống phải cập nhật biên độ an toàn động liên tục theo thời gian thực để xử lý các kịch bản va chạm đa phương hướng.

Tối ưu hóa đa mục tiêu và ràng buộc cứng: Nghiên cứu tích hợp bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) cùng với ASMC để giải quyết bài toán tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ. Đồng thời, việc thiết lập các ràng buộc cứng (Hard Constraints) cho cơ cấu chấp hành như giới hạn góc lái và tốc độ quay vòng sẽ giúp quỹ đạo né tránh sát với đặc tính vật lý thực tế của tàu nạo vét.

Điều khiển biên đội (Formation Control): Mở rộng phương pháp điều khiển cho bài toán phối hợp nhiều thực thể tàu cùng bám quỹ đạo và hỗ trợ né tránh lẫn nhau trong các nhiệm vụ cứu hộ hoặc tuần tra biển.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Hữu Quyền: Nghiên cứu, xây dựng mô hình toán, thiết kế bộ điều khiển. **Trương Công Mỹ:** Xây dựng mô hình mô phỏng, tổng hợp kết quả

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

Chúng tôi không có bất kỳ xung đột lợi ích với bất kỳ tổ chức, cá nhân nào và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, trung thực và hợp pháp của nội dung công trình này.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ không được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Huu Quyen*. *Vietnam Maritime University*

2nd Truong Cong My. *Vietnam Maritime University*

*Corresponding author: quyen.h.dtd@vimaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2021. ISBN: 978-1119575054
- [2] J. Li, G. Zhang, W. Zhang, Q. Shan, and W. Zhang, "Cooperative path following control of USV-UAVs considering low design complexity and command transmission requirements," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 9, no. 1, pp. 715–724, 2024, doi: 10.1109/TIV.2023.3317336.
- [3] P. Albers, *Motion Control in Offshore and Dredging*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-8803-1.
- [4] C. K. Tam, R. Bucknall, and A. Greig, "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters," *J. Navig.*, vol. 62, no. 3, pp. 455–476, 2009. doi: 10.1017/S0373463308005134.
- [5] G. Zhang, C. Huang, X. Zhang, and B. Tian, "Robust adaptive control for dynamic positioning ships in the presence of input constraints," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 1172–1182, 2019. doi: 10.1007/s00773-018-0616-5.
- [6] G. Zhang, S. Chu, J. Huang, and W. Zhang, "Robust adaptive fault-tolerant control for unmanned surface vehicle via the multiplied event-triggered mechanism," *Ocean Engineering*, vol. 249, p. 110755, 2022. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110755.
- [7] A. J. Sørensen, "A survey of dynamic positioning control systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 35, no. 1, pp. 123–136, Apr. 2011. doi: 10.1016/j.arcontrol.2011.03.008
- [8] M. Movahhed, S. Dadashi and M. Danesh, "Adaptive sliding mode control for autonomous surface vessel," *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 522–527. doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971341.
- [9] X. Liu, B. Sun, and Z. Su, "Trajectory tracking control of AUV in complex environments based on dynamic event-triggered mechanism," *Asian Journal of Control*, vol. 28, no. 2, p. 890, 2026. doi: 10.1002/asjc.3677.
- [10] H. Zhang, Y. Li, and X. Wang, "Collision avoidance for autonomous surface vessels using novel artificial potential fields," *Ocean Engineering*, vol. 289, p. 116011, 2023. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.116011.
- [11] Y. Li, X. Zhang, and H. Chen, "Sliding mode control for trajectory tracking of underactuated marine surface vessels under disturbances," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2024. doi: 10.1177/09544089231212424.
- [12] D. Zhao, H. Liang, and S. K. Spurgeon, "Robust adaptive terminal sliding mode control for dynamic positioning of a semi-submersible offshore platform," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 41, no. 5, pp. 1361–1372, 2019. doi: 10.1177/0142331218778108.
- [13] W. Yu, H. Xu, X. Han, Y. Chen, and M. Zhu, "Fault-tolerant control for dynamic positioning vessel with thruster faults based on the neural modified extended state observer," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 51, no. 9, pp. 5905–5917, Sep. 2021. doi: 10.1109/TSMC.2019.2956806.
- [14] L. Degorre, E. Delaleau, C. Join, and M. Fliess, "Guidance and control of unmanned surface vehicles via HEOL," *IFAC PapersOnLine*, vol. 59, no. 12, pp. 13–18, 2025. doi: 10.1016/j.ifacol.2025.09.560.
- [15] E. A. Basso, E. H. Thyri, K. Y. Pettersen, M. Breivik, and R. Skjetne, "Safety-critical control of autonomous surface vehicles in the presence of ocean currents," in *Proc. IEEE Conf. Control Technol. Appl. (CCTA)*, 2020, pp. 396–403. doi: 10.1109/CCTA41146.2020.9206276.
- [16] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 90–98, Mar. 1986. doi: 10.1177/027836498600500106
- [17] CheeKuang Tam, Richard Bucknall "Review of collision avoidance and path planning algorithms used in autonomous underwater vehicles," *Electronics*, vol. 11, no. 15, p. 2301, 2022. doi: 10.3390/electronics11152301.
- [18] Pulkit Paliwal "Improved artificial potential field method for motion-planning of autonomous vehicles," *Conference: 2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*. link: https://www.researchgate.net/publication/369776465_Improved_Artificial_Potential_Field_Method_for_Motion-Planning_of_Autonomous_Vehicles

- [19] K. Wang, Y. Zhao, S. Hou, and H. Sun, "Dynamic obstacle avoidance for unmanned underwater vehicle based on an improved artificial potential field," *CAAI Trans. Intell. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 47–52, 2014.
doi: 10.3969/j.issn.1673-4785.201309038.
- [20] G. Langxiong, X. Li, T. Yan, L. Song, J. Xiao, and Y. Shu, "Intelligent ship path planning based on improved artificial potential field in narrow inland waterways," *Ocean Eng.*, vol. 317, p. 119928, Feb. 2025.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119928.
- [21] D.-H. Chun, M.-I. Roh, H. Lee, and J. Ha, "Deep reinforcement learning-based collision avoidance for an autonomous ship," *Ocean Eng.*, vol. 234, p. 109216, 2021.
doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109216.
- [22] S. C. Orzechowski, "Regulatory scoping exercise for the future adoption of autonomous inland ships in Europe," *J. Shipp. Trade*, vol. 9, art. 2, 2024.
doi: 10.1186/s41072-023-00160-x.
- [23] N. E. Kahveci and P. A. Ioannou, "Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis," *Automatica*, vol. 49, no. 3, pp. 685–697, Mar. 2013.
doi: 10.1016/j.automatica.2012.11.026.
- [24] C. Tao, X. Zhang, Y. Liu, and J. Wang, "Distributed coordinated motion control of multiple UAVs based on IPSO-DNMPC," *Sci. Rep.*, vol. 14, art. 83243, 2024.
doi: 10.1038/s41598-024-83243-4.
- [25] A. Coraddu, S. Donnarumma, K. Chu, and M. Figari, "Energy efficient propulsion system for dynamic positioning application: design and assessment," in *Proc. Int. Ship Control Syst. Symp. (iSCSS)*, Glasgow, U.K., Oct. 2018.
doi: 10.24868/issn.2631-8741.2018.012.