



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.4.67-79>

*Corresponding author:

Email address:

nguyenvantien@vimaru.edu.vn

Received: 03/10/2025

Received in Revised Form:
23/11/2025

Accepted: 03/12/2025

Eliminating steady-state error in ship trajectory control problem via integral sliding mode control

Nguyen Van Tien^{1*}, Do Khac Tiep², Dinh Gia Huy³

^{1,2}Faculty of Electrical – Electronics, Vietnam Maritime University, Vietnam

³AIT Research Group, Ho Chi Minh City University of Transport, Vietnam

Abstract: This paper presents the design and analysis of an Integral Sliding Mode Control (ISMC) to address the trajectory tracking problem for a six-degree-of-freedom (6-DOF) ship model. Traditional Sliding Mode Control (SMC), despite its high robustness against disturbances and model uncertainties, often suffers from steady-state errors when the system is subjected to constant or slowly varying disturbances. By integrating an integral component into the sliding surface, the proposed ISMC is capable of completely eliminating these steady-state errors, ensuring superior trajectory tracking accuracy. The stability of the system is rigorously proven based on Lyapunov stability theory. Simulation results in MATLAB/Simulink are presented to compare the performance of the proposed ISMC with traditional SMC and PID controllers, thereby confirming the superiority of the proposed method.

Keywords: Ship Control, 6-DOF ship model, Sliding mode control, Steady-state error elimination, Robust control.



Khử sai số xác lập trong bài toán điều khiển quỹ đạo tàu thủy bằng phương pháp điều khiển trượt-tích phân

Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.4.67-79>

*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ Email:

nguyenvantien@vamaru.edu.vn

Ngày nộp bài: 03/10/2025

Ngày nộp bài sửa: 23/11/2025

Ngày chấp nhận: 03/12/2025

Nguyễn Văn Tiến^{1*}, Đỗ Khắc Tiệp², Đinh Gia Huy³

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

²Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

email: dokhactiep@vamaru.edu.vn

³Nhóm nghiên cứu AIT, Trường Đại học Giao thông vận tải TP. HCM

email: duy.dinh@ut.edu.vn

Tóm tắt: Bài báo này trình bày việc thiết kế và phân tích một bộ điều khiển trượt - tích phân ISMC (Integral Sliding Mode Control) nhằm giải quyết bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho mô hình tàu thủy sáu bậc tự do 6-DOF. Các bộ điều khiển trượt SMC truyền thống, mặc dù có tính bền vững cao trước nhiễu và bất định của mô hình, thường tồn tại sai số xác lập khi hệ thống chịu tác động của các nhiễu hằng hoặc biến đổi chậm. Bằng cách tích hợp một thành phần tích phân vào trong mặt trượt, bộ điều khiển ISMC được đề xuất có khả năng loại bỏ sai số tĩnh hiệu quả, đảm bảo độ chính xác bám quỹ đạo vượt trội. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh chặt chẽ dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink được thực hiện để so sánh hiệu năng của bộ điều khiển ISMC và SMC, PID truyền thống, qua đó khẳng định tính ưu việt của phương pháp được đề xuất.

Từ khóa: Điều khiển tàu thủy, mô hình tàu 6 bậc tự do, điều khiển trượt, khử sai số xác lập, điều khiển bền vững.

1. Giới thiệu

Việc đảm bảo tàu thủy di chuyển chính xác theo một quỹ đạo định trước là yêu cầu cốt lõi trong hàng hải hiện đại, quyết định đến hiệu quả kinh tế, an toàn và sự thành công của các nhiệm vụ từ vận tải, khảo sát đến quân sự. Bài toán điều khiển quỹ đạo cho tàu thủy, đặc biệt với mô hình động học phức tạp sáu bậc tự do càng trở nên thách thức khi phải đối mặt với các yếu tố nhiễu động liên tục và bất định từ môi trường như gió, sóng, và dòng chảy. Do đó, việc phát triển các thuật toán điều khiển bền vững và chính xác cao luôn là một chủ đề nhận được sự quan tâm lớn từ cộng đồng nghiên cứu.

Trong những năm qua, nhiều phương pháp đã được đề xuất để giải quyết bài toán này. Các bộ điều khiển PID kinh điển, nhờ sự đơn giản và dễ triển khai, đã được ứng dụng rộng rãi, tuy nhiên hiệu năng của chúng suy giảm đáng kể khi mô hình hệ thống có tính phi tuyến cao và chịu tác động của nhiễu lớn [1, 2]. Để cải thiện, các phương pháp điều khiển tiên tiến đã được nghiên cứu. Đáng chú ý, phương pháp điều khiển trượt được đánh giá cao nhờ tính bền vững vượt trội trước sự bất định của mô hình và nhiễu ngoại cảnh. Nhiều công trình đã áp dụng thành công SMC cho bài toán điều khiển hướng và bám quỹ đạo của tàu thủy [3, 4]. Tuy nhiên, một hạn chế cố hữu của SMC truyền

thống là sự tồn tại của hiện tượng rung tần số cao (chattering) và sự xuất hiện của sai số xác lập khi hệ thống chịu tác động của các nhiễu có thành phần một chiều, chẳng hạn như dòng chảy không đổi [5].

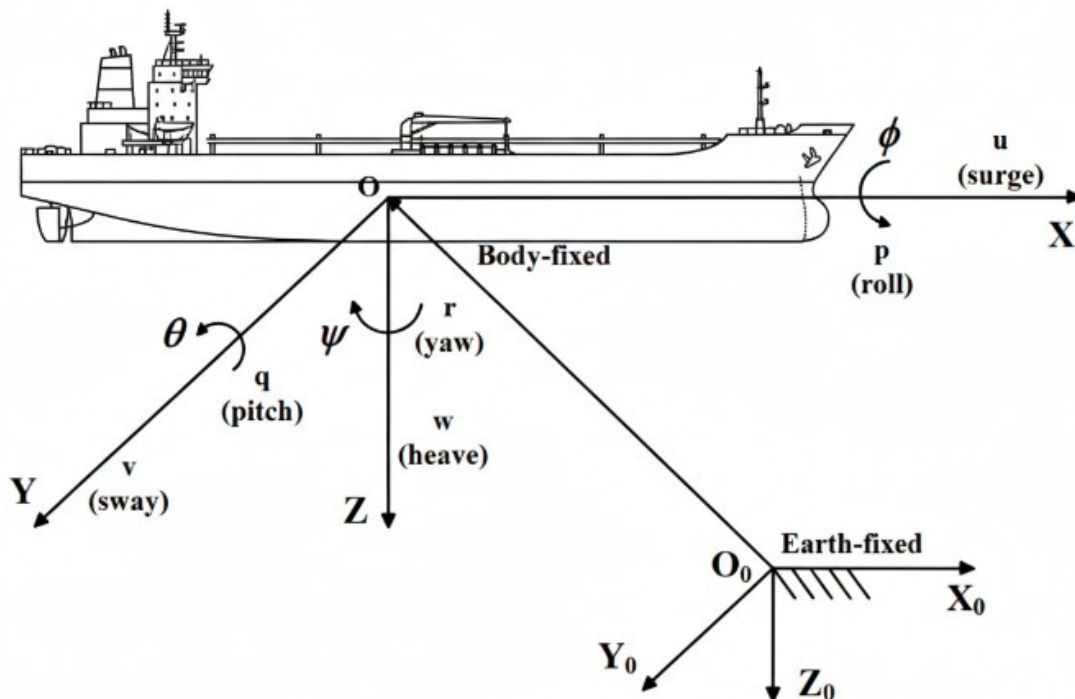
Để khắc phục các nhược điểm trên, nhiều cải tiến đã được đề xuất. Các phương pháp điều khiển thích nghi kết hợp với SMC được phát triển để ước tính và bù trừ các thành phần bất định, giúp tăng độ chính xác [6, 7]. Mặc dù vậy, các bộ điều khiển này thường có cấu trúc phức tạp, đòi hỏi khối lượng tính toán lớn và việc hội tụ của các tham số thích nghi không phải lúc nào cũng được đảm bảo. Các kỹ thuật điều khiển thông minh như mạng nơ-ron và logic mờ cũng được tích hợp vào SMC để giảm chattering và cải thiện hiệu năng [8, 9]. Tuy nhiên, việc thiết kế các luật mờ hay huấn luyện mạng nơ-ron đòi hỏi một lượng lớn dữ liệu và kinh nghiệm chuyên gia, đồng thời việc phân tích ổn định toán học của chúng cũng là một thách thức. Một số nghiên cứu gần đây tập trung vào các bộ quan sát nhiễu để ước tính và bù trừ tác động của môi trường, nhưng hiệu quả của bộ quan sát phụ thuộc nhiều vào dải tần của nhiễu và có thể gây ra độ trễ trong vòng điều khiển [10].

Phân tích các công trình trên cho thấy, mặc dù đã có nhiều nỗ lực cải tiến, việc loại bỏ hoàn toàn sai số xác lập một cách hiệu quả trong khi vẫn duy trì cấu trúc điều khiển đơn giản và tính bền vững vẫn là một khoảng trống nghiên cứu cần được giải quyết. Xuất phát từ thực tế đó, bài báo này đề xuất một giải pháp trực tiếp và hiệu quả: điều khiển trượt - tích phân ISMC. Bộ điều khiển ISMC không chỉ kế thừa toàn bộ tính bền vững vốn có của SMC mà còn đảm bảo sai số bám quỹ đạo sẽ hội tụ về không, ngay cả khi có mặt các nhiễu hằng.

2. Mô hình tàu thủy

Mô hình tàu thủy dạng vector-ma trận được Fossen hệ thống hóa và tiêu chuẩn hóa trong luận án tiến sĩ năm 1991 [1], mô hình này đã thống nhất và tiêu chuẩn hóa các mô hình thủy động lực học cổ điển, thành một dạng ma trận-véc tơ tinh gọn, giúp đơn giản hóa cho việc thiết kế hệ thống điều khiển.

Để dẫn dắt các phương trình động, lực học của tàu, chúng ta thiết lập hai hệ trục tọa độ như Hình 1. Hệ trục tọa độ cố định (Earth-fixed) gắn với mặt đất và hệ tọa độ tương đối gắn tại tâm đối xứng (Body-fixed) của tàu.



Hình 1. Định nghĩa các hệ trục tọa độ của tàu

Vector η mô tả vị trí và tư thế (pose) của tàu so với hệ quy chiếu gắn với cố định:

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$$

x, y, z : tọa độ vị trí của tâm tàu trong hệ tọa độ cố định Trái Đất

ϕ, θ, ψ : góc lắc ngang (roll), góc chúi (pitch), góc hướng (yaw)

Vector v chứa thành phần vận tốc tuyến tính và vận góc trong hệ quy chiếu tương đối:

$$v = [u, v, w, p, q, r]^T$$

u, v, w : lần lượt là vận tốc dọc (surge), vận tốc lệch ngang (sway), vận tốc lên xuống (heave)

p, q, r : vận tốc góc lắc ngang (roll rate), vận tốc góc chúi (pitch rate), vận tốc xoay (yaw rate),

Lực tổng τ quán tác động lên tàu, phát sinh từ lực đẩy, gió, sóng và dòng hải lưu, được ký hiệu là:

$$\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$$

trong đó X, Y, Z là thành phần lực dọc tàu, ngang tàu và thẳng đứng. Các thành phần K, M, N lần lượt là mô-men lắc ngang, mô-men chúi và mô-men xoay trở

Các giả thiết sau phải đảm bảo để mô hình Fossen có thể dùng để mô tả cho các phương tiện hàng hải:

Ma trận khối lượng xác định dương, nói cách khác con tàu phải có tính đối xứng. để đảm bảo rằng động năng của phương tiện luôn lớn hơn 0 khi phương tiện đang chuyển động.

$M = 0$: Điều này có nghĩa là ma trận khối lượng không đổi theo thời gian.

$v^T C(v)v = 0$, ma trận $C(v)$ đại diện cho các lực Coriolis và lực hướng tâm chúng luôn vuông góc với phương của vận tốc nên chúng không sinh công. Biểu thức trên đảm bảo điều đó.

$v^T D(v)v > 0$ với mọi $v \neq 0$. Biểu thức trên đại diện cho công suất bị tiêu tán do lực cản. Việc nó luôn lớn hơn 0 khi tàu đang di chuyển ($v \neq 0$) đảm bảo rằng mô hình luôn thể hiện đúng sự tiêu hao năng lượng này.

Khi những giả thiết trên được đảm bảo thì

mối quan hệ giữa hai vector η và v được cho bởi ma trận chuyển đổi Jacobian $J(\eta)$. Ma trận này được xây dựng dựa trên ba góc Euler (Roll, Pitch, Yaw) định nghĩa trong Hình 1, thực hiện phép chuyển đổi vận tốc từ hệ quy chiếu gắn với tàu (Body-fixed) sang hệ quy chiếu cố định (Earth-fixed):

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

Mối quan hệ giữa lực tác động và gia tốc của tàu, dựa trên phương trình Newton-Euler. Phương trình này được viết dưới dạng phi tuyến, véc-tơ-ma trận trong hệ tọa độ tương đối như sau:

$$\begin{cases} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \\ M = M_{RB} + M_A \\ C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \end{cases} \quad (2)$$

trong đó:

M_{RB} : Ma trận quán tính của vật rắn tuyệt đối, chứa khối lượng tàu và các mô men quán tính của tàu theo trục (x, y, z) .

M_A : Ma trận khối lượng gia tăng, biểu thị lực cần thiết để gia tốc khối nước xung quanh tàu.

$C(v)$: Ma trận Coriolis và hướng tâm. Ma trận này biểu diễn các lực ảo xuất hiện khi chuyển động trong một hệ quy chiếu quay

C_{RB} : Thành phần tạo ra do quán tính của vật rắn.

C_A : Thành phần do khối lượng gia tăng

$D(v)$: Ma trận giảm chấn thủy động

$g(\eta)$: Lực và mô men thủy tĩnh.

2.1. Động học tàu thủy

Ma trận $J(\eta)$ Để mô tả phép biến đổi từ hệ quy chiếu tương đối (Body-fixed) và hệ quy chiếu cố định. Ma trận $J(\eta)$ thu được bằng các phép quay và phép tịnh tiến:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} R_{zyx}(\eta) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & T_{zyx}(\eta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kí hiệu $R_{zyx}(\eta)$ là ma trận xoay và $T_{zyx}(\eta)$ ma trận biến đổi tịnh tiến và được cho bởi công thức sau [2]:

$$\mathbf{R}_{zyx}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi)$$

$$= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{zyx}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi)$$

$$= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2. Động lực học tàu thủy

Gọi $\mathbf{r}_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ và $\mathbf{r}_B^b = [x_B, y_B, z_B]^T$ lần lượt biểu thị các vector từ gốc tọa độ cố định của đến trọng tâm của tàu và tâm lực đẩy. Để đơn giản hóa việc tính toán, giả thiết rằng tích có hướng của hai vector được biểu diễn dưới dạng phép nhân ma trận $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{S}(\mathbf{a})\mathbf{b}$, với $\mathbf{S}(\mathbf{a})$ là một ma trận đối xứng lệch:

$$\mathbf{S}(\mathbf{a}) = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Các ma trận $\mathbf{M}_{RB}$ và $\mathbf{M}_A$ trong công thức (2) được xác định như sau [11]:

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & -m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G^b) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{r}_G^b) & \mathbf{I}_b^b \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Thành phần ma trận khối lượng gia tăng và ma trận Coriolis có thể được biểu thị dưới dạng hàm của các đạo hàm thủy động lực học, được suy ra bằng cách sử dụng công thức Lagrange dựa trên các phương trình Kirchhoff, phương pháp này, đã được Fossen chứng minh cho tàu thuyền [2].

2.3. Phương trình chuyển động tương đối

Các lực và mô-men từ môi trường có thể được đưa vào mô hình bằng cách sử dụng vận tốc tương đối đối với dòng chảy. Đồng thời, các lực tác động do gió ($\boldsymbol{\tau}_{wind}$) và sóng ($\boldsymbol{\tau}_{wave}$) có thể được

cộng vào bằng phương pháp xếp chồng tuyến tính. Vận tốc tương đối của tàu được tính bằng công thức:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c \quad (7)$$

Với $\mathbf{v}$ là vector vận tốc của tàu, $\mathbf{v}_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$ là dòng chảy đại dương giải thiết không xoáy.

Vận tốc tương đối này làm thay đổi các lực và mô-men thủy động, vì sự tương tác của phương tiện hoặc tàu với khối chất lỏng xung quanh phụ thuộc vào vận tốc của nó so với nước. Phương trình (2) được viết lại thành:

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{M}_A \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} \quad (8)$$

Ma trận Coriolis đầy đủ rất phức tạp, nó mô tả các lực quán tính sinh ra do tương tác giữa phương tiện và dòng nước và phụ thuộc vào tất cả các thành phần vận tốc, khiến cho việc phân tích và thiết kế bộ điều khiển trở nên khó khăn. Do vậy các phương trình chuyển động tương đối có thể được đơn giản hóa bằng cách sử dụng ma trận Coriolis và hướng tâm của vật rắn $\mathbf{C}_{RB}^{v_2}(\mathbf{v})$ ma trận này độc lập với thành phần vận tốc tới u (surge velocity). Thuộc tính quan trọng này đã được Hegrenæs [12] nghiên cứu và chỉ ra rằng:

$$\mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}^{v_2}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \mathbf{M}_{RB} \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_{RB}^{v_2}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r \quad (9)$$

Thay thế về phải của (14) vào (13), các phương trình chuyển động tương đối được đơn giản hóa thành:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} \quad (10)$$

Lực cản do gió chủ yếu tạo ra lực theo phương dọc (surge), phương ngang (sway) và quay (yaw), do đó các thành phần X_{wind} , Y_{wind} , N_{wind} là đáng kể nhất. Lực gió tác động lên phần thân tàu phía trên mặt nước được tính dựa trên các nguyên tắc khí động học cơ bản như sau [12]:

$$\begin{cases} X_{wind} = 0.5\rho_a A_f U_R^2 C_{wX}(\alpha_R) \\ Y_{wind} = 0.5\rho_a A_s U_R^2 C_{wY}(\alpha_R) \\ N_{wind} = 0.5\rho_a A_L L_{oa} U_R^2 C_{wN}(\alpha_R) \end{cases} \quad (11)$$

trong đó $C_{wX}(\alpha_R), C_{wY}(\alpha_R), C_{wN}(\alpha_R)$ là hệ số lực và mô-men khí động học, phụ thuộc vào góc hướng gió tương đối α_R ; A_f, A_s : Diện tích chắn gió theo phương x, y, A_L là Diện tích chắn gió bên. Các hệ số khí động học này thường được xác định bằng thực nghiệm (thử nghiệm trong hầm gió) hoặc CFD (Computational Fluid Dynamics).

Các sóng bậc nhất tạo ra lực dao động làm tàu chuyển động lên xuống, qua lại. Ngoài ra, còn có lực sóng bậc hai, hay còn gọi là lực trôi dạt. Đây là những lực không đổi hoặc thay đổi rất chậm, có xu hướng đẩy tàu đi theo hướng truyền sóng một cách từ từ. Để xác định mô men lực do sóng (τ_{wave}) cần áp dụng toán tử đáp ứng biên độ RAOs (Response Amplitude Operator). để có chuỗi lực. Trong chương 6 của tác giả Fossen [2] trình bày một cách rõ ràng cách sử dụng RAO của lực (cả bậc nhất và bậc hai) để tạo ra vector lực sóng:

$$\tau_j(t) = \sum_{i=1}^N |RAO_i(\omega_i, \beta)| \cdot A_i \cdot \cos(\omega_i t + \epsilon_i + \phi_{RAO_i}(\omega_i, \beta)) \quad (12)$$

trong đó $RAO_i(\omega_i, \beta)$ là biên độ của RAO cho lực tại tần số ω_i và hướng sóng β , ϕ_{RAO_i} là pha của RAO, thể hiện độ trễ giữa đỉnh sóng và đỉnh lực, A_i là biên độ của thành phần sóng hình sin thứ i, được suy ra từ phổ sóng.

2.4. Thiết lập mô phỏng chuyển động của tàu trên máy tính

Mặc dù chúng ta cần vận tốc tương đối v_r để tính toán các lực cản của nước, nhưng khi cập nhật vị trí và vận tốc mới của con tàu ở bước thời gian tiếp theo, chúng ta phải làm việc với vận tốc tuyệt đối v . Chúng ta đã giả thiết ở trên dòng hải lưu là không xoáy, dẫn đến việc có thể mô tả nó bằng lý thuyết dòng chảy thế. Về mặt thực tế, điều này có nghĩa là vận tốc dòng hải lưu $v_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$ vẫn đồng nhất về mặt không gian và không đổi trong khung tọa độ tương đối. Do đó có thể biểu diễn đạo hàm của vector vận tốc tương đối theo công thức sau:

$$\dot{v}_c^b = -S(v_2)v_c^b \quad (13)$$

trong đó $v_2 = [p, q, r]^T$ là vector vận tốc góc của tàu, $v_c^b = [u_c, v_c, w_c]^T$ là vector vận tốc tuyến tính của dòng hải lưu được biểu thị trong hệ quy chiếu tương đối. Từ (13) và (7), đạo hàm của vector vận tốc tuyệt đối được tính như sau:

$$\dot{v} = \begin{bmatrix} -S(v_2)v_c^b \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} + M^{-1} \begin{pmatrix} \tau + \tau_{wind} + \tau_{wave} - \\ C(v_r)v_r - D(v_r)v_r - g(\eta) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Giải pháp số được thực hiện bằng cách tích phân phương trình vi phân (14) để cho ra vận tốc tuyệt đối.

Quy trình mô phỏng trên máy tính sẽ diễn ra như sau:

Tại một thời điểm, ta biết vận tốc tuyệt đối của v tàu. Dùng vận tốc dòng chảy không đổi v_c để tính vận tốc tương đối v_r theo công thức (7). Sau đó dùng v_r để tính toán tất cả các lực thủy động theo công thức (10);

Tổng hợp tất cả các lực (thủy động, động cơ, gió, sóng...) để tìm ra gia tốc tuyệt đối $\dot{v}$ theo công thức (14);

Tích phân gia tốc tuyệt đối $\dot{v}$ để tìm ra vận tốc tuyệt đối v mới cho bước thời gian tiếp theo.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi thử nghiệm mô phỏng tàu KVLCC2 [13], đây là loại tàu dầu được sử dụng trong nhiều nghiên cứu. Bước thời gian mô phỏng, chúng tôi chọn bằng 0.1. Do đặc tính động lực học của tàu KVLCC2 có quán tính lớn và tần số đáp ứng thấp, bước thời gian này đủ nhỏ để đảm bảo độ chính xác của phép giải tích phân số mà không gây lãng phí tài nguyên tính toán. Trong bài thử nghiệm đánh giá độ chính xác của mô hình theo IMO [14], thực hiện cho tàu đang chạy thẳng ở tốc độ tối đa 7.5m/s, bẻ lái 35° sang một bên và giữ nguyên cho đến khi tàu quay được ít nhất 540°. Kết quả mô phỏng vòng quay trở và các giá trị vận tốc như trên Hình 2.

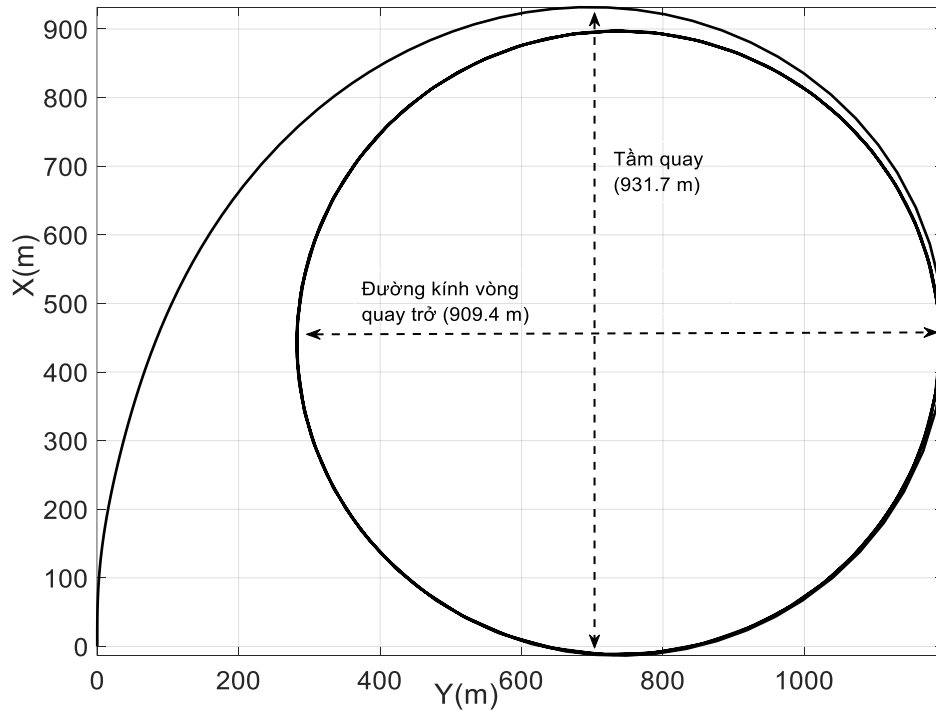
Các kết quả mô phỏng trong kỷ yếu hội thảo SIMMAN 2008 [13] và các bài báo khoa học [15-17] cung cấp các giá trị tham khảo đáng tin cậy về

bộ thông số thử nghiệm chuẩn của tàu KVLCC2. Bảng 1 công bố kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực tế.

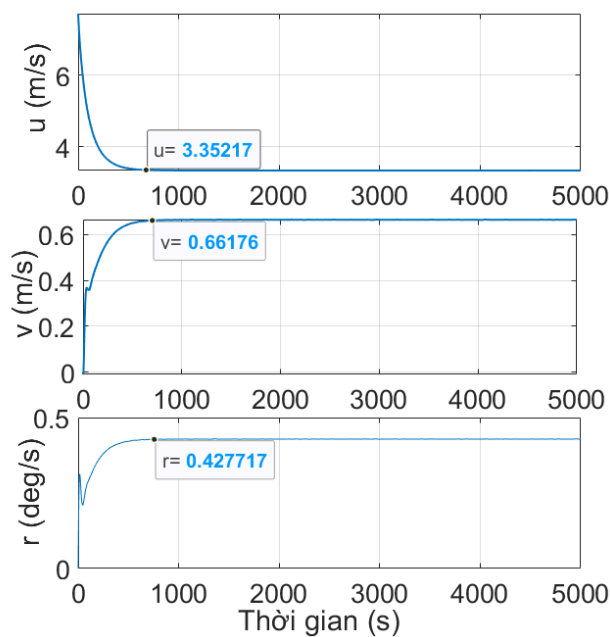
Kết quả mô phỏng cho thấy, các giá trị vận tốc dọc, vận tốc ngang và vận tốc xoay đều nằm trong phạm vi tham chiếu. Đường kính vòng quay trở và tầm quay có sai lệch nhỏ 8.1% so khoảng

tham chiếu.

Nhìn chung, mô hình mô phỏng cho kết quả rất tốt và có độ tin cậy cao khi so sánh với các dữ liệu chuẩn được công bố. Hầu hết các thông số quan trọng đều nằm trong phạm vi cho phép, cho thấy mô hình đã nắm bắt chính xác các đặc tính động lực học của con tàu.



(a)



(b)

Hình 2. Kết quả thử nghiệm tàu KVLCC2 ở thử nghiệm bể lái 35° : (1) vòng quay trở; (b) vận tốc dài, vận tốc ngang và vận tốc xoay của tàu

Bảng 1. Kết quả mô phỏng tàu KVLCC2

Thông số	Phạm vi tham chiếu trong tài liệu [13,15-17]	Kết quả mô phỏng	Sai số so với phạm vi tham chiếu
Đường kính vòng quay trở	990-1060 (m)	909.4 (m)	8.1%
Tầm quay	960-1025	931.7 (m)	2.9%
Vận tốc dọc (u)	3.3-3.8 (m/)	3.35 (m/s)	0%
Vận tốc ngang (v)	0.62-0.88 (m/s)	0.66 (m/s)	0%
Vận tốc xoay (r)	0.35-0.45 (độ/s)	0.42 (độ/s)	0%

3. Thiết kế bộ điều khiển ISMC

Điều khiển trượt SMC là một kỹ thuật điều khiển phi tuyến mạnh mẽ. Ý tưởng chính của SMC là thiết kế một mặt trượt trong không gian trạng thái của hệ thống. Đồng thời một luật điều khiển chuyển mạch sẽ áp dụng lên hệ thống có tác dụng buộc hệ thống phải di chuyển về phía mặt trượt và giữ cho hệ thống luôn nằm trên mặt trượt đó.

Trong nghiên cứu, này chúng tôi đề xuất thiết kế một mặt trượt có chứa thành phần tích phân của sai số. Điều này đảm bảo sai số xác lập sẽ tiến về không, nghĩa là triệt tiêu được sai lệch tĩnh.

3.1. Định nghĩa mặt trượt và sai số quỹ đạo

Giả sử quỹ đạo mong muốn là η_d và vận tốc mong muốn là $\nu_d(t)$. Sai số quỹ đạo e được định nghĩa như sau:

$$e = \eta - \eta_d = [e_x, e_y, e_z, e_\phi, e_\theta, e_\psi]^T \quad (15)$$

Từ phương trình (1), chúng ta xác định được hàm $\dot{e}$ của e :

$$\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d = J(\eta)\nu - \dot{\eta}_d \quad (16)$$

Mặt trượt chưa khâu tích phân được chọn như sau:

$$s = \dot{e} + \Lambda_1 e + \Lambda_0 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (17)$$

trong đó $s = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]^T$ là vector mặt trượt, Λ_0, Λ_1 là các ma trận đường chéo, có các phần tử dương, được chọn để đảm bảo tính ổn định của mặt trượt. Các giá trị này quyết định tốc độ hội tụ của sai số, khi $s = 0$ ta có:

$$\dot{e} + \Lambda_1 e + \Lambda_0 \int_0^t e(\tau) d\tau = 0 \quad (18)$$

Phương trình (18) là một phương trình vi phân tích phân bậc hai đồng nhất. Bằng cách chọn Λ_0, Λ_1 phù hợp, ta có thể đảm bảo rằng sai số $e(t)$ sẽ hội tụ về 0 khi $t \rightarrow \infty$. Các tham số bộ điều khiển được lựa chọn dựa trên nguyên lý phân bố điểm cực cho động học sai số. Với đặc tính quán tính lớn của tàu KVLCC2, chúng tôi chọn tần số tự nhiên $\omega_n \approx 0.13$ (rad/s) và hệ số suy giảm $\zeta \approx 0.58$. Từ đó, các ma trận trọng số mặt trượt được xác định tương ứng:

$$\Lambda_1 = \omega_n^2 \cdot I \approx \text{diag}[0.017, 0.017, 0.017]$$

$$\Lambda_0 = 2\zeta\omega_n \cdot I \approx \text{diag}[0.15, 0.15, 0.15]$$

Việc lựa chọn $\zeta \approx 0.58$ (thay vì 0.707) giúp hệ thống có thời gian tăng tốc (rise time) nhanh hơn để bám sát các thay đổi hướng đi đột ngột, chấp nhận một tỷ lệ vọt lố nhỏ nằm trong giới hạn cho phép.

Luật điều khiển τ được chia thành hai thành phần chính:

τ_{eq} : Luật điều khiển tương đương. Đây là thành phần điều khiển cần thiết để giữ hệ thống trên mặt trượt.

τ_{sw} : Luật điều khiển chuyển mạch. Đây là thành phần dùng để kéo quỹ đạo trạng thái về phía mặt trượt và chống lại nhiễu loạn.

Luật điều khiển tổng hợp:

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{sw} \quad (19)$$

Để tìm τ_{eq} , ta bắt đầu bằng cách lấy đạo hàm mặt trượt:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_0 e \quad (20)$$

Từ (10), ta có thể biểu diễn $\ddot{e}$ theo τ và giải

phương trình $\dot{s} = 0$ để tìm τ_{eq} , kết quả là:

$$\tau_{eq} = C(v)v + D(v)v + g(\eta) - MJ^{-1}(\eta)(J(\eta)v - \ddot{\eta}_d + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_0 e) \quad (21)$$

Luật điều khiển chuyển mạch τ_{sw} được thiết kế để đảm bảo điều kiện tiếp cận ($s, \dot{s} < 0$), nói cách khác thành phần τ_{sw} buộc quỹ đạo trạng thái phải hướng về mặt trượt. Trong nghiên cứu này, để giảm hiện tượng chattering (dao động tần số cao), chúng tôi sử dụng hàm bão hòa $\text{sat}(s/\Phi)$, hàm này được định nghĩa là:

$$\text{sat}(s/\Phi) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & \text{if } |s| > \Phi \\ s/\Phi & \text{if } |s| \leq \Phi \end{cases}$$

với Φ là một hằng số dương, được gọi là độ dày của lớp biên. Φ được tinh chỉnh thực nghiệm, bắt đầu từ giá trị lớn để giảm chattering, sau đó giảm dần Φ cho đến khi đạt được sai số bám yêu cầu mà tín hiệu điều khiển vẫn nằm trong giới hạn bão hòa của cơ cấu chấp hành.

Luật điều khiển chuyển mạch τ_{sw} khi đó được xác định bởi phương trình:

$$\tau_{sw} = K \cdot \text{sat}(s/\Phi) \quad (22)$$

trong đó $K = \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ là ma trận đường chéo với các phần tử dương. K được chọn bằng thực nghiệm trong quá trình mô phỏng. Các giá trị của K phải được chọn đủ lớn để vượt qua ảnh hưởng của nhiễu và bất định của mô hình.

3.2. Chứng minh tính ổn định

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống điều khiển trượt tích phân, chúng ta sẽ sử dụng phương pháp ổn định Lyapunov [3]. Chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} s^T M s \quad (23)$$

trong đó M là ma trận khối lượng và quán tính của tàu, việc đưa M vào hàm Lyapunov không phải là bắt buộc, tuy nhiên nó giúp đơn giản hóa đáng kể quá trình chứng minh tính ổn định bằng cách tránh được phép tính ma trận nghịch đảo.

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov thì hệ thống sẽ ổn định khi đạo hàm của V là xác định âm. Từ

(23), ta có:

$$\dot{V} = s^T M \dot{s} \quad (24)$$

Giải thiết rằng các thành phần $\ddot{\eta}_d, \dot{J}$ đều bị chặn trên. Điều này cũng đảm bảo rằng bộ điều khiển có thể tính toán để bù lại các thành phần bất định. Khi đó đạo hàm mặt trượt có thể viết lại thành:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e \approx J\dot{v} \quad (25)$$

Từ (2) và (30) ta có:

$$M\dot{s} = J^T(\tau - \tau_d - C v - D v - g) \quad (26)$$

Thành phần τ_{eq} đã được thiết kế để triệt tiêu chính xác các thành phần động lực học của hệ thống tức là $(C v - D v - g = 0)$ nếu τ_{eq} được thiết kế đúng. Do đó, sau khi thay thế và rút gọn, ta thu được:

$$M\dot{s} = -K \cdot \text{sat}(s/\Phi) + \tilde{\tau}_d \quad (27)$$

Trong đó $\tilde{\tau}_d$ đại diện cho nhiễu và các thành phần bất định của mô hình. Thay thế (27) vào (24) thu được:

$$\dot{V} = -s^T K \cdot \text{sat}(s/\Phi) + s^T \tilde{\tau}_d \quad (28)$$

Thành phần $-s^T K \cdot \text{sat}(s/\Phi)$ trong biểu thức của $\dot{V}$ luôn lớn hơn hoặc bằng 0 do K là ma trận đường chéo với các phần tử dương. Thành phần thứ 2 là $s^T \tilde{\tau}_d$ đại diện cho ảnh hưởng của nhiễu. Nó có thể là dương hoặc âm và có khả năng làm tăng gây mất ổn định. Để đảm bảo $\dot{V}$ luôn âm, ta cần thành phần điều khiển đủ mạnh để loại bỏ ảnh hưởng của nhiễu. Tức là:

$$\sum_{i=1}^6 k_i |s_i| > s^T \tilde{\tau}_d \quad (29)$$

Giả sử nhiễu bị chặn, tức là $|\tilde{\tau}_{di}| \leq \delta_i$ với δ_i là một hằng số dương. Khi đó:

$$s^T \tilde{\tau}_d = \sum s_i \tilde{\tau}_{di} \leq \sum |s_i| |\tilde{\tau}_{di}| \leq \sum \delta_i |s_i| \quad (30)$$

Vậy, điều kiện để $\dot{V} < 0$ là:

$$\dot{V} \leq -\sum k_i |s_i| + \sum \delta_i |s_i| = -\sum (k_i - \delta_i) |s_i| \quad (31)$$

Nói cách khác, để $\dot{V} < 0$ chúng ta phải chọn hệ số khuếch đại K đủ lớn sao cho:

$$k_i > \delta_i \quad \forall i = 1, \dots, 6$$

Nếu điều kiện trên được thỏa mãn, ta sẽ có $\dot{V} \leq -\eta \sum |s_i|$ | đảm bảo rằng $\dot{V}$ là xác định âm.

4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển ISMC, một kịch bản mô phỏng được xây dựng trong MATLAB/Simulink. Mô hình đối tượng là tàu KVLCC2 6-DOF phi tuyến đầy đủ, trong khi bộ điều khiển ISMC được thiết kế dựa trên mô hình Nomoto rút gọn. Mô hình nhiễu gồm dòng chảy và mô hình gió được thêm vào hệ thống để kiểm tra khả năng khử sai số xác lập. Kết quả của bộ điều khiển ISMC được so sánh với bộ điều khiển SMC truyền thống và bộ điều khiển PID với các tham số đã được tối ưu hóa.

Trong kịch bản mô phỏng đầu tiên, con tàu bắt đầu với hướng đi 0° , đến thời điểm 100 s, tiến hành rẽ trái sang trái 35° và giữ nguyên cho đến thời điểm 2000 s. Tại thời điểm 2000 s rẽ trái ngược lại 35° và duy trì đến khi kết thúc mô phỏng. Trên Hình 3 là hướng tàu trong kịch bản mô phỏng thứ nhất. Dựa trên đồ thị, có thể thấy trong điều kiện không có sóng, gió các bộ điều khiển đều cho thấy khả năng làm việc hiệu quả bám theo hướng đặt (đường nét liền). Tuy nhiên, điều khiển ISMC (màu cam) thể hiện khả năng tốt hơn ở khả năng hạn chế độ quá điều chỉnh so với PID (5.7%) và SMC (3.1%). Bộ điều khiển SMC bị dao động mạnh do bản chất chuyển mạch đột ngột và tức thời của luật điều khiển. Bộ điều khiển ISMC có mức độ dao động thấp hơn rất nhiều so với SMC. Bản thân thành phần Tích phân trong ISMC không phải trực tiếp khử dao động. Tuy nhiên do đặc tính của khâu tích phân là tích lũy sai số theo thời gian, điều đó dẫn tới tín hiệu điều khiển của ISMC chậm hơn nhưng chính xác hơn, không gây ra việc chuyển mạch đột ngột như SMC.

Trong kịch bản mô phỏng thứ 2, nhiễu dòng chảy và gió được đưa vào. Từ 0 đến 2000 s con tàu chỉ chịu ảnh hưởng của gió có tốc độ tương đối là 15m/s, thổi tới với góc 120° so với mũi tàu. Từ khoảng thời gian 2000 s, con tàu chịu thêm mô men cản do sóng có độ cao 1m, chu kỳ là 8 s. Kết quả mô phỏng khả năng giữ hướng đi của tàu trong

kịch bản này được thể hiện như trên Hình 4.

Từ Hình 4, có thể thấy rõ rằng với bộ điều khiển SMC truyền thống, góc hướng đi của tàu ổn định nhưng tồn tại một sai số xác lập so với giá trị đặt. Ngược lại, bộ điều khiển ISMC đã thành công đưa đáp ứng của tàu bám sát vào giá trị đặt. Mặc dù vẫn còn tồn tại một sai lệch nhỏ do sai số của số học và bản chất của điều khiển trượt, nhưng mức sai số này ($\sim 2.27^\circ$) là không đáng kể so với kích thước tàu dài hàng trăm mét và nhỏ hơn nhiều so với PID và SMC. Bộ điều khiển PID với thành phần tích phân duy trì được sai số xác lập bằng 0, tuy nhiên vì là một bộ điều khiển tuyến tính lên tốc độ phản ứng với nhiễu chậm, điều này có thể thấy thông qua thời gian xác lập của PID dài 1400 s so với ISMC chỉ là 300s. Tính toán sai số tuyệt đối trung bình MAE (Mean Absolute Error) trong khoảng thời gian mô phỏng cho thấy MAE của ISMC là 2.27 (m) nhỏ hơn đáng kể so với SMC (5.57) và PID (3.75). Điều này khẳng định rằng thành phần tích phân đã thực hiện đúng chức năng của nó là bù trừ nhiễu loạn không đổi.

Trong kịch bản mô phỏng thứ 3, con tàu được đặt quỹ đạo dạng hình sin với chiều dài một chu kỳ $\lambda = 20000\text{m}$ và biên độ $A = 400\text{m}$.

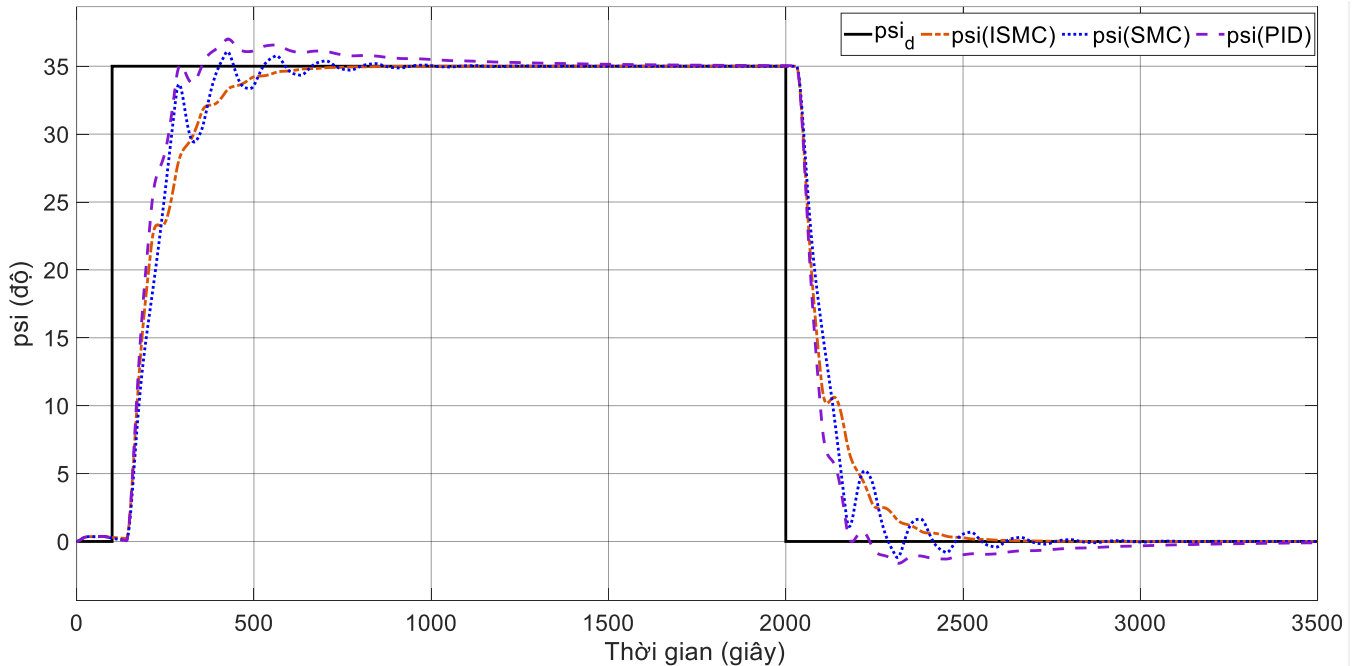
Kết quả mô phỏng Hình 5, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu năng giữa ba bộ điều khiển. Bộ điều khiển ISMC (nét đứt) thể hiện khả năng bám quỹ đạo vượt trội, chính xác và ổn định hơn hẳn so với PID (nét gạch) và SMC truyền thống (đường chấm-gạch). Với ISMC, sai số giữa quỹ đạo thực của tàu và đường quỹ đạo đặt (nét liền) là rất nhỏ trong suốt quá trình di chuyển. Tại các đoạn có độ cong lớn (tại các đỉnh và đáy của hình sin), nơi yêu cầu sự thay đổi hướng đi nhanh và chính xác. Không có hiện tượng vọt lố hay dao động đáng kể.

Với bộ điều khiển PID có hiện tượng quá điều chỉnh rõ rệt tại hai đỉnh (5000m và 15000m), quỹ đạo của tàu vượt lên cao hơn cả biên độ 400m. Ngoài ra, bộ điều khiển có xu hướng cắt góc, không bám sát được những đoạn cong của quỹ đạo.

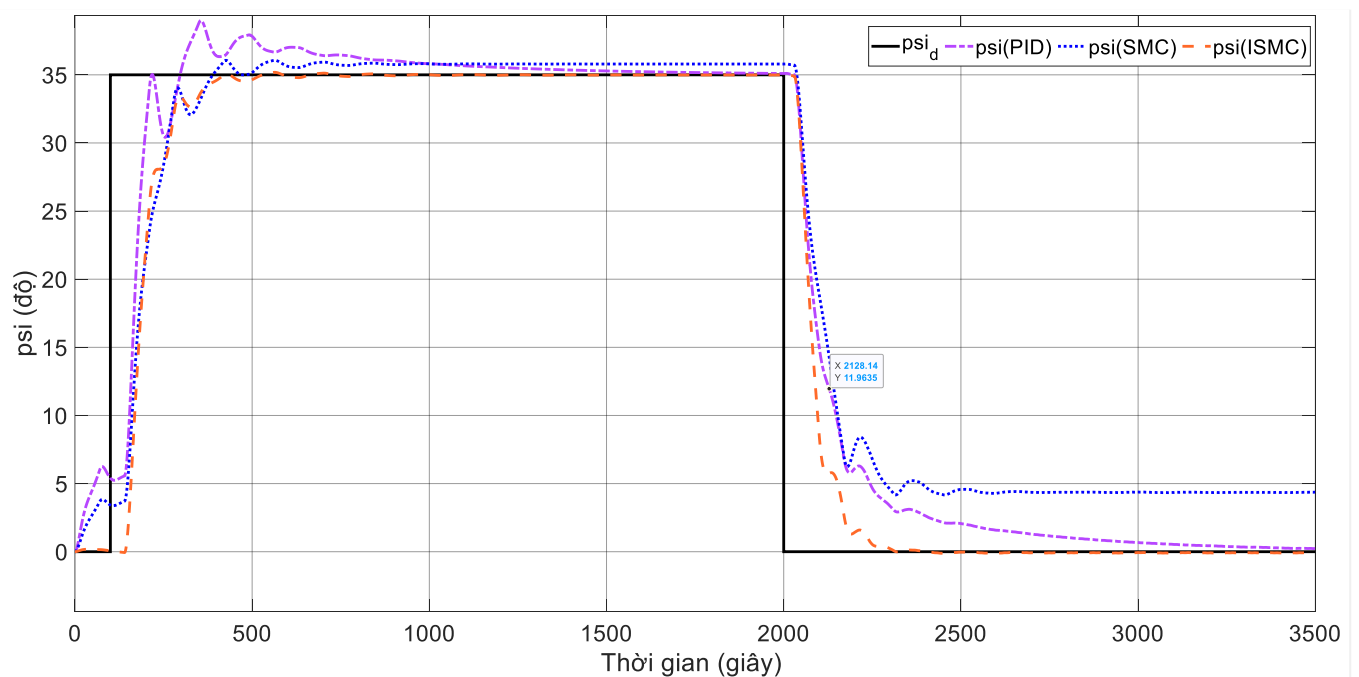
Quỹ đạo của SMC luôn nằm bên trong quỹ đạo đặt. Tại các đỉnh và đáy, tàu không thể đạt tới biên độ $\pm 400\text{m}$ mà chỉ đạt khoảng $\pm 380\text{m}$.

Đây là biểu hiện điển hình của sai số xác lập trong điều khiển trượt. Mặc dù bền vững, SMC truyền thống không thể triệt tiêu hoàn toàn sai số khi có các yếu tố động học hoặc nhiễu không được bù trừ. Kết quả này chứng tỏ sự cần thiết của thành phần tích phân mà ISMC đã bổ sung. Mặc dù ISMC

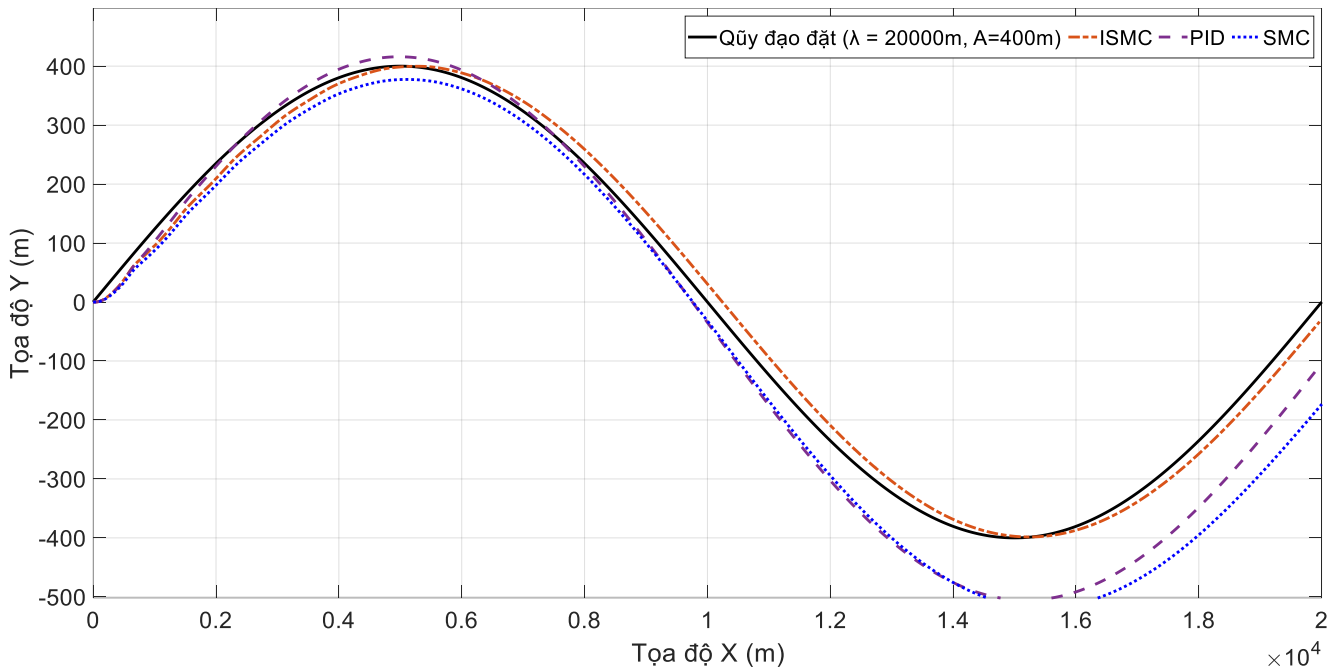
yêu cầu khối lượng tính toán lớn hơn SMC truyền thống do thêm biến trạng thái tích phân, nhưng với năng lực xử lý của các vi điều khiển hiện nay, sự gia tăng này là không đáng kể. Đổi lại, độ chính xác cao hơn là sự đánh đổi xứng đáng cho các nhiệm vụ yêu cầu khắt khe về quỹ đạo.



Hình 3. Đáp ứng góc hướng đi của ISMC, SMC và PID trong trường hợp không có nhiễu (kịch bản 1)



Hình 4. Góc hướng đi của tàu khi chịu ảnh hưởng của nhiễu sóng, gió trong kịch bản 2



Hình 5. Quỹ đạo chuyển động của tàu khi sử dụng ISMC, SMC và PID với quỹ đạo đặt có dạng hình sin

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày thành công việc thiết kế và ứng dụng bộ điều khiển trượt tích phân (ISMC) để giải quyết bài toán khử sai số xác lập trong điều khiển quỹ đạo tàu thủy. Bằng cách bổ sung thành phần tích phân vào cấu trúc mặt trượt, bộ điều khiển đề xuất đã chứng tỏ khả năng loại bỏ hoàn toàn sai số ở trạng thái xác lập gây ra bởi các nhiễu loạn không đổi, một hạn chế của bộ điều khiển SMC truyền thống. Kết quả mô phỏng cho thấy ISMC giảm sai số MAE xuống còn 2.27 so với 5.57 của SMC.

Kết quả mô phỏng trên mô hình tàu KVLCC2 phức tạp đã xác thực tính hiệu quả và ưu việt của phương pháp ISMC. Bộ điều khiển không chỉ đảm bảo hệ thống bám chính xác quỹ đạo mong muốn mà còn giữ được tính bền vững vốn có của phương pháp điều khiển trượt. Hướng phát triển trong tương lai có thể bao gồm việc kết hợp ISMC với các giải thuật tối ưu để tự động lựa chọn tham số điều khiển hoặc các bộ quan sát để ước lượng nhiễu loạn một cách chính xác hơn.

Tài liệu tham khảo

[1] T.I. Fossen. (1991). Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles. *Universitetet i*

Trondheim (Norway) ProQuest Dissertations & Theses, 1991. 9207821.

- [2] T.I. Fossen. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. *John Wiley & Sons.*
- [3] R. Yu, Q. Zhu, G. Xia, Z. Liu. (2012). Sliding mode tracking control of an underactuated surface vessel. *IET Control Theory & Applications*, 6(3). <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0176>
- [4] M.T. Vu, T.-H. Le, H.L.N.N. Thanh, T.-T. Huynh, M. Van, Q.-D. Hoang, T.D. Do. (2021). Robust Position Control of an Over-actuated Underwater Vehicle under Model Uncertainties and Ocean Current Effects Using Dynamic Sliding Mode Surface and Optimal Allocation Control. *Sensors*, 21(3), 747. <https://doi.org/10.3390/s21030747>
- [5] J.-J.E. Slotine, W. Li. (1991). Applied nonlinear control. *Prentice-Hall.*
- [6] X. Hu, J. Chen, C. Lv, Z. Yang, J. Li. (2024). Adaptive Finite-Time Trajectory Tracking Control for Underactuated Surface Vehicles Based on Adaptive Disturbance Compensating. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles.*

- <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3404960>
- [7] D. Mu, X. Zou, G. Wang, Y. Fan, Y. Zhao, J. Yang. (2022). Robust Adaptive Path Following Control Strategy for Underactuated Unmanned Surface Vehicle with Unknown Time-varying Disturbance. *34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 3923-3928. <https://doi.org/10.1109/CCDC55256.2022.10034027>
- [8] T. Jiang, Y. Yan, D. Wu, S. Yu, T. Li. (2022). Neural network based adaptive sliding mode tracking control of autonomous surface vehicles with input quantization and saturation. *Ocean Engineering*, 265, 112505. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112505>
- [9] R. Wang, Z. Shen. (2017). Fuzzy adaptive iterative sliding mode control for sail-assisted ship trajectory tracking. *4th International Conference on Information, Cybernetics and Computational Social Systems (ICCSS)*, pp. 105-110. <https://doi.org/10.1109/ICCSS.2017.8091394>
- [10] W.-H. Chen, J. Yang, L. Guo, S. Li. (2016). Disturbance-Observer-Based Control and Related Methods—An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2), pp. 1083-1095. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2478397>
- [11] S.I. Sagatun, T.I. Fossen. (1991). Lagrangian Formulation of Underwater Vehicles' Dynamics. *Conference Proceedings 1991 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1029-1034. vol.2. doi: 10.1109/ICSMC.1991.169823
- [12] N.V. Tiến, Đ.K. Tiếp, T.S. Biên. (2025). Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển giữ hướng cho tàu thủy sử dụng điều khiển mờ kết hợp với điều khiển trượt. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Giao thông vận tải*, 14(3), 130-138. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(3\).130-138](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(3).130-138)
- [13] M. Acanfora, M. Altosole, S. Pennino. (2025). A numerical model of ship manoeuvring for the KVLCC2 hull, in regular and long-crested irregular waves. *Ocean Engineering*, 333, 121579. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121579>
- [14] International Maritime Organization. (2022). Res. MSC.137(76), Standards for Ship Manoeuvrability, London, U.K.: IMO.
- [15] L. Larsson, F. Stern, M. Visonneau. (2008). Proceedings of the First International Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods (SIMMAN 2008).
- [16] F.H.H.A. Quadvlieg, J. Brouwer. (2011). KVLCC2 Benchmark Data Including Uncertainty Analysis to Support Manoeuvring Predictions. *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2011*.
- [17] D.J. Yeo, K. Yun, Y. Kim. (2016). Experimental study on the manoeuvrability of kvlcc 2 in shallow water, 4th MASHCON, Hamburg – Uliczka et al. (eds), pp. 287-294. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-38-0_32