Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải
Journal of Transportation Science and Technology
Trang tạp chí: https://tapchicongnghegtvt.vn

Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển giữ hướng cho tàu thủy sử dụng điều khiển mờ kết hợp với điều khiển trượt

Research on heading control system design for ships using fuzzy logic control combined with sliding mode control

Nguyễn Văn Tiến[1,*], Đỗ Khắc Tiệp[1], Trần Sinh Biên[1]

[1]*Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam*

Từ khóa:
Điều khiển trượt
Điều khiển mờ
Mô hình MMG
Điều khiển bền vững
Giữ hướng tàu thủy

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển mờ FLC (Fuzzy logic controller) kết hợp với bộ điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Controller) cho hệ thống giữ hướng của tàu thủy nhằm cải thiện chất lượng điều khiển giữ hướng đi. Bộ điều khiển mờ-trượt FSMC (Fuzzy Sliding Mode Controller) kết hợp ưu điểm của điều khiển trượt về tính ổn định và mạnh mẽ với khả năng xử lý thông tin mờ của điều khiển mờ để giảm hiện tượng chattering và tăng cường khả năng chống nhiễu. Mô hình MMG được sử dụng để mô tả động lực học của tàu. Các kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho thấy FSMC có khả năng bám quỹ đạo tốt, thời gian đáp ứng nhanh, độ vọt lố nhỏ, sai số xác lập thấp và khả năng chống nhiễu tốt hơn so với SMC thuần túy. Nghiên cứu này góp phần nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống điều khiển tàu thủy trong điều kiện hoạt động thực tế.

Keywords:
Sliding mode control
Fuzzy logic control
MMG
Robust control
Heading control

ABSTRACT

This paper presents the research on the design of a Fuzzy Sliding Mode Controller for ship heading control systems to enhance the heading control performance. The FSMC combines the advantages of SMC in terms of stability and robustness with the fuzzy information processing capability of FLC to reduce chattering phenomenon and improve disturbance rejection. MMG model is utilized to describe the ship's dynamics. Simulation results obtained in MATLAB/Simulink demonstrate that the FSMC exhibits superior trajectory tracking performance, rapid response time, minimal overshoot, low steady-state error, and enhanced disturbance rejection compared to conventional SMC. This research contributes to improving the efficiency and reliability of ship control systems in real-world operating conditions.

* Nguyễn Văn Tiến. Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam
Email: nguyenvantien@vimaru.edu.com

https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(3).130-138
Ngày nhận bài: 23/3/2025; Ngày nhận bài sửa: 20/4/2025; Ngày chấp nhận đăng: 23/04/2025
Ngày xuất bản trực tuyến: 15/05/2025
pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Điều khiển tàu thủy an toàn và hiệu quả là một vấn đề quan trọng trong ngành hàng hải và các hoạt động khai thác tài nguyên biển. Tàu thủy là một hệ thống động lực học phi tuyến mạnh, chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố bất định như tải trọng thay đổi, thông số thủy động lực học không chính xác, và nhiễu loạn từ môi trường (gió, sóng, dòng chảy).

Trong những năm qua, nhiều phương pháp điều khiển đã được áp dụng cho tàu thủy, bao gồm điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) [1], điều khiển LQR (Linear Quadratic Regulator) [2], điều khiển mô hình dự báo MCP (Model Predictive Control) [3], điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Control) [4], [5], và điều khiển mờ FLC (Fuzzy Logic Control) [6]. Bộ điều khiển PID đơn giản, dễ thực hiện, nhưng khó đạt được chất lượng cao khi đối mặt với tính phi tuyến và bất định lớn. LQR và MPC yêu cầu mô hình chính xác, điều này khó đáp ứng trong thực tế. SMC có ưu điểm về tính ổn định và mạnh mẽ, nhưng có thể gây ra hiện tượng chattering (dao động tần số cao) trong tín hiệu điều khiển, ảnh hưởng đến cơ cấu chấp hành. FLC có khả năng xử lý thông tin không chắc chắn và không yêu cầu mô hình chính xác, nhưng thiết kế bộ điều khiển mờ thường dựa trên kinh nghiệm chuyên gia và khó đảm bảo tính ổn định.

Để khắc phục những hạn chế trên, nghiên cứu này đề xuất thiết kế bộ điều khiển trượt-mờ FSMC cho mô hình MMG của tàu thủy. FSMC kết hợp ưu điểm của SMC là đảm bảo tính ổn định và khả năng bám quỹ đạo, trong khi FLC được sử dụng để điều chỉnh các thông số của SMC một cách trực tuyến, giảm chattering và tăng cường khả năng thích nghi với sự thay đổi của môi trường và thông số tàu.

2. Mô hình MMG cho tàu thủy

Mô hình MMG (Manoeuvring Mathematical Group) là một mô hình toán học được sử dụng rộng rãi để mô tả động lực học của tàu thủy khi di chuyển. Nó là một công cụ quan trọng trong thiết kế hệ thống điều khiển và làm cơ sở để phát triển các bộ điều khiển tự động.

Mô hình MMG được biểu diễn bằng một hệ phương trình vi phân phi tuyến. Mô hình MMG về cơ bản gồm 2 loại là:

- Mô hình 6-DOF, mô hình này mô tả đầy đủ chuyển động của tàu trong không gian 3 chiều (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw);
- Mô hình 3-DOF, thường được sử dụng để mô tả chuyển động trong mặt phẳng ngang gồm: Surge (dọc tàu), Sway (ngang tàu) và Yaw (quay vòng), bỏ qua chuyển động lên xuống (heave), nghiêng ngang (roll) và chúi/ngửa (pitch).

Trong rong bài toán điều khiển lái và giữ hướng, các chuyển động quan trọng nhất là surge, sway và yaw. Chuyển động heave (lên xuống) thường không ảnh hưởng nhiều đến việc lái và giữ hướng. Chuyển động roll (nghiêng ngang) mặc dù có ảnh hưởng, nhưng trong nhiều trường hợp, sự ảnh hưởng này có thể được xử lý như một dạng nhiễu hoặc được kiểm soát bởi một hệ thống riêng (ví dụ: hệ thống chống lắc). Chuyển động pitch (chúi/ngửa) tương tự như roll, có thể được coi là nhiễu hoặc được điều khiển riêng.

Trong nghiên cứu này sử dụng mô hình đơn giản hóa 3-DOF cho thiết kế bộ điều khiển giữ hướng. Việc giảm số bậc tự do từ 6 xuống 3 giúp đơn giản hóa đáng kể các phương trình động lực học. Điều này làm cho việc thiết kế, phân tích và tính toán bộ điều khiển trở nên dễ dàng hơn.

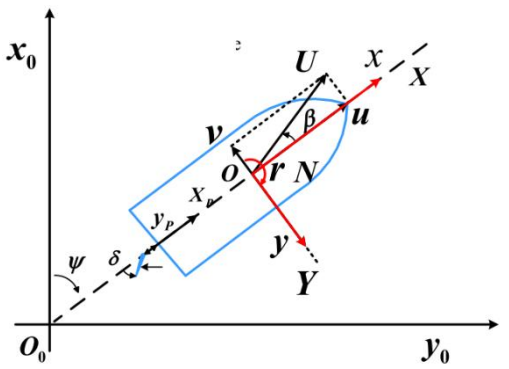
Xét hệ tọa độ gắn với thân tàu như Hình 1. Phương trình điều khiển của tàu được thể hiện dưới dạng sau [3]:

$$\begin{cases} (m + X_{\dot{u}})\dot{u} - (m + Y_{\dot{v}})vr - (mx_G + Y_{\dot{r}})r^2 = X_P + X_R \\ (m + Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m - X_{\dot{u}})ur + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_R \\ (I_z + N_{\dot{r}})\dot{r} + (mx_G + N_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G + Y_{\dot{r}})ur = N_R \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

- m: Khối lượng tàu;
- x_G: Tọa độ trọng tâm theo trục x;
- I_z: Mô men quán tính của tàu quanh trục z;
- $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{r}}$, $N_{\dot{r}}$, $N_{\dot{v}}$: Các đạo hàm thủy động lực học cộng thêm vào khối lượng tàu;
- u, v, r: Vận tốc dọc, ngang và tốc độ góc quay (yaw rate);
- $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{r}$: Gia tốc dọc, ngang và góc quay;
- X_P: Lực đẩy của chân vịt;
- X_R, Y_R, N_R: Lực và mô-men do bánh lái.

Trong bài toán điều khiển hướng có thể bỏ qua bộ điều khiển tốc độ khi đó ta coi lực đẩy của chân vịt là hằng số mà sẽ tập trung điều khiển N_R (mô-men lái) để điều khiển hướng đi.



Hình 1. Các hệ tọa độ và các vector thành phần của tàu thủy.

Các lực và mô men thủy động lực học do bánh lái tạo ra có thể được biểu thị như sau:

$$\begin{cases} X_R = -(1-t_R)F_N \sin\delta \\ Y_R = -(1-a_H)F_N \cos\delta \\ N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos\delta \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: t_R là hệ số gia tăng lực cản do bánh lái; a_H là hệ số ảnh hưởng của thân tàu lên lực ngang của bánh lái; x_R Khoảng cách từ bánh lái đến trọng tâm tàu (theo trục x); x_H Khoảng cách tác dụng hiệu quả của lực ngang thân tàu; F_N là lực pháp tuyến của bánh lái.

Lựa pháp tuyến bánh lái F_N có thể tính theo công thức:

$$F_N = 0.5\rho A_R V_R^2 C_L(\alpha_R) \quad (3)$$

Trong đó:

- A_R: Là diện tích bánh lái;
- V_R: Vận tốc dòng chảy tác động đến bánh lái;
- $C_L(\alpha_R)$: Hệ số nâng, phụ thuộc vào góc tấn hiệu quả α_R.

Sự nhiễu loạn của gió có tác động lớn hơn đến sự an toàn của tàu. Mô hình nhiễu loạn của gió được thể hiện bởi công thức (4).

$$\begin{cases} X_{wind} = 0.5\rho_a A_f U_R^2 C_{wx}(\alpha_R) \\ Y_{wind} = 0.5\rho_a A_s U_R^2 C_{wy}(\alpha_R) \\ N_{wind} = 0.5\rho_a A_L L_{oa} U_R^2 C_{wn}(\alpha_R) \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:

- $C_wx(\alpha_R)$, $Cwy(\alpha_R)$ và $Cwn(\alpha_R)$ là hệ số lực và mô-men khí động học, phụ thuộc vào góc hướng gió tương đối α_R;
- A_x, A_y: Diện tích chắn gió theo phương x, y.
- A_L: 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.

3. Thiết kế bộ điều khiển trượt

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" (sliding surface) trong không gian trạng thái của hệ thống. Mặt trượt này được định nghĩa sao cho nếu trạng thái của hệ thống nằm trên mặt trượt, thì hệ thống sẽ hội tụ về trạng thái mong muốn.

Sau khi có được mặt trượt, một luật điều khiển chuyển mạch (Switching control law) sẽ áp dụng lên hệ thống. Luật điều khiển này có tác dụng buộc hệ thống phải di chuyển về phía mặt trượt và giữ cho hệ thống luôn nằm trên mặt trượt đó. Khi hệ thống không nằm trên mặt

trượt, luật điều khiển chuyển mạch sẽ "đẩy" hệ thống về phía mặt trượt. Khi hệ thống đã đến mặt trượt, luật điều khiển sẽ "giữ" hệ thống trượt dọc theo mặt trượt này cho đến khi đạt đến trạng thái mong muốn. Ưu điểm lớn nhất của SMC là tính bền vững (Robustness), nghĩa là hệ thống ít nhạy cảm với sự thay đổi của các thông số hệ thống và các yếu tố nhiễu bên ngoài.

3.1. Xác định mặt trượt

Mục tiêu điều khiển là điều khiển hướng đi của tàu ψ theo giá trị mong muốn ψ_d, mặt trượt được định nghĩa như sau:

$$s = c.e_{\psi} - e_r \tag{5}$$

Trong đó:

- $e_{\psi} = \psi - \psi_d$ là sai lệch góc hướng của tàu;
- $e_r = r - r_d$ là sai lệch của tốc độ quay so với giá trị đặt;
- c là một hằng số dương quyết định đến độ dốc của mặt trượt.

3.2. Thiết kế luật điều khiển

Chọn luật điều khiển trượt có dạng tổng quát:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \tag{6}$$

Trong đó:

- u là giá trị điều khiển;
- u_{eq} là giá trị điều khiển để cần thiết để hệ thống giữ ổn định trên mặt trượt;
- u_{sw}: thành phần giúp duy trì hệ thống trên mặt trượt. Nếu s > 0 (hệ thống nằm "phía trên" mặt trượt), u_{sw} sẽ âm, "kéo" hệ thống xuống phía mặt trượt. Nếu s < 0 (hệ thống nằm "phía dưới" mặt trượt), u_{sw} sẽ dương, "đẩy" hệ thống lên phía mặt trượt.

Để tìm u_{eq}, ta xét đạo hàm của s

$$\dot{s} = c\dot{e}_{\psi} + \dot{e}_r = cr + \dot{r} \tag{7}$$

Thay $\dot{r}$ từ (1) vào (7):

$$\dot{s} = cr + \frac{N_R - (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} - mx_G + Y_{\dot{r}}}{I_z - N_{\dot{r}}} \tag{8}$$

Khi hệ thống ổn định trên mặt trượt thì $\dot{s} = 0$, giải phương trình vi phân (8) để tìm u_{eq}:

$$u_{eq} = N_{Req} = (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})ur - cr(I_z - N_{\dot{r}}) \tag{9}$$

Thành phần chuyển mạch u_{sw} được xác định bởi biểu thức:

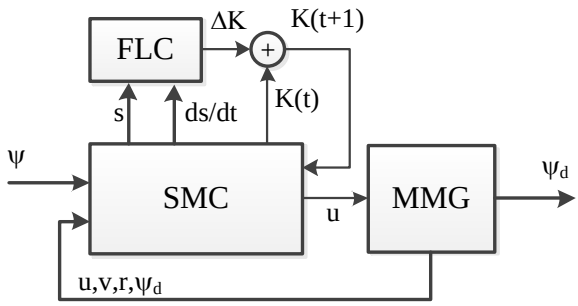
$$u_{sw} = -K\,\mathrm{sgn}(s) \tag{10}$$

K là một hằng số dương, giá trị của K phải đủ lớn để vượt qua các yếu tố bất định và nhiễu.

Hàm dấu *sgn(s)* có giá trị là +1 khi $s > 0$, -1 khi $s < 0$, và 0 khi $s = 0$. Đây là một hàm không liên tục tại 0. Khi hệ thống tiến gần đến mặt trượt (s tiến gần 0), hàm dấu sẽ chuyển đổi qua lại giữa +1 và -1 một cách đột ngột. Sự chuyển đổi không liên tục này dẫn đến việc tín hiệu điều khiển u_{sw} cũng thay đổi đột ngột và liên tục giữa hai giá trị $-K$ và $+K$ dẫn tới hiện tượng chattering. Đây là hiện tượng không mong muốn sẽ gây mòn, hỏng cơ cấu chấp hành và giảm độ chính xác và hiệu quả của hệ thống điều khiển. Trong nghiên cứu này sẽ đề xuất phương pháp để giảm charttering bằng cách sử dụng một bộ điều khiển mờ FLC.

3.3 Thiết kế bộ điều khiển mờ

Vai trò của FLC là Điều chỉnh giá trị K trong u_{sw} một cách trực tuyến. Chọn đầu vào thứ nhất của bộ điều khiển là s và đầu vào thứ 2 là $\dot{s}$ để cải thiện đặc tính động của bộ điều khiển. Cấu trúc điều khiển FSMC như trên Hình 2.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển giữ hướng với bộ điều khiển FSMC.

Nguyên tắc chung khi thiết kế FLC là:

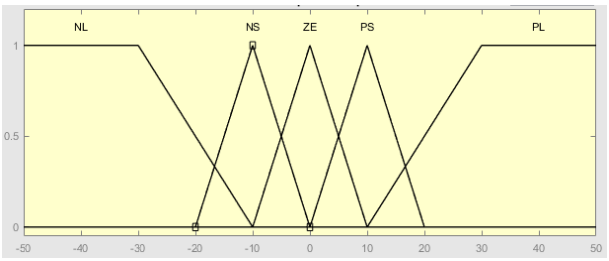
- Khi *s* và *Δs* lớn (cùng dấu): Tăng *K* mạnh để nhanh chóng đưa hệ thống về mặt trượt;
- Khi *s* và *Δs* nhỏ (gần 0): Giảm *K* để tránh chattering;
- Khi *s* và *Δs* trái dấu: Điều chỉnh *K* một cách vừa phải.

Trên cơ sở nguyên tắc đó các hàm liên thuộc vào ra được thiết kế như Hình 3 và luật điều khiển như trong Bảng 1.

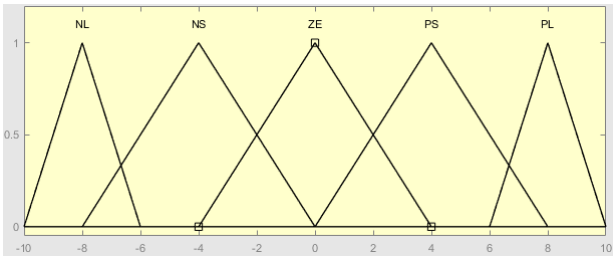
Đầu vào *s* và *ṡ* gồm 5 hàm liên thuộc là: NL (Negative Large); NS (Negative Small); ZE (Zero);PS (Positive Small); PL (Positive Large).

Đầu ra ΔK gồm 5 hàm liên thuộc là: NB (Negative Big); NM (Negative Medium); NS; ZE; PS; PM (Positive Medium); PB (Positive Big).

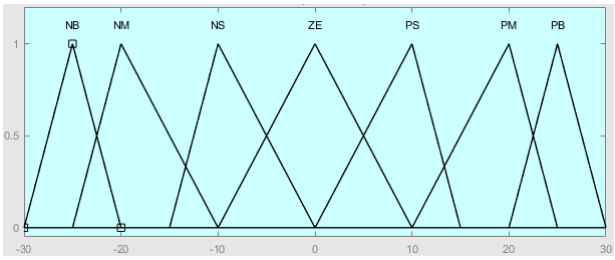
Phạm vi và giá trị của các đầu vào/ra của bộ điều khiển FLC được mô tả như trên Hình 3, Hình 4, Hình 5.



Hình 3. Hàm liên thuộc đầu cho đầu vào s.



Hình 4. Hàm liên thuộc cho đầu vào *ṡ*.

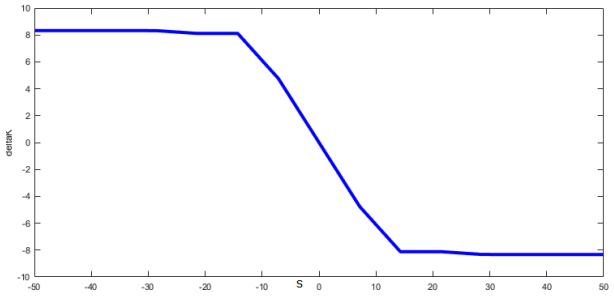


Hình 5. Hàm liên thuộc cho đầu ra ΔK.

Sử dụng quy tắc giải mờ mamdani [9] với luật mờ chỉ ra như Bảng 1, mối quan hệ giữa s và ΔK được thể hiện trong Hình 6.

Bảng 1. Luật mờ cho đầu ra ΔK.

STT	s	ṡ	K	STT	s	ṡ	K
1	NL	NL	PB	**13**	ZE	ZE	ZE
2	NL	NS	PM	**14**	ZE	PS	ZE
3	NL	ZE	PS	**15**	ZE	PL	NS
4	NL	PS	ZE	**16**	PS	NL	NM
5	NL	PL	NB	**17**	PS	NS	ZE
6	NS	NL	PM	**18**	PS	ZE	NS
7	NS	NS	PS	**19**	PS	PS	NS
8	NS	ZE	PS	**20**	PS	PL	NB
9	NS	PS	ZE	**21**	PL	NL	NB
10	NS	PL	NM	**22**	PL	NS	ZE
11	ZE	NL	PS	**23**	PL	ZE	NS
12	ZE	NS	ZE	**24**	PL	PS	NM
				25	PL	PL	PB



Hình 6. Mối quan hệ phi tuyến giữa s và ΔK.

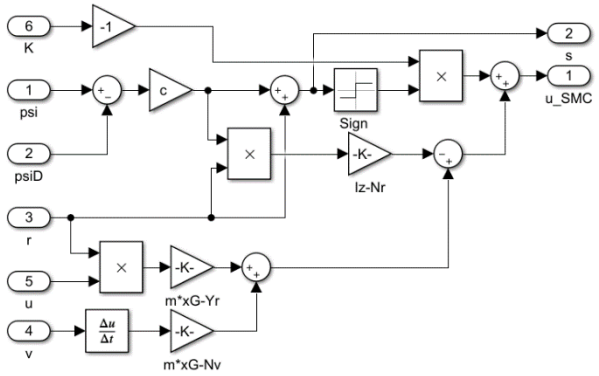
Trên cơ sở quan hệ phi tuyến giữa *s* và *ΔK* do hệ thống mờ tạo ra ta có thể nhật thấy rằng:

- Khi $s \le -10$ hoặc $s \ge 10$: *ΔK* có giá trị dương lớn (khoảng +8 đến +9). Điều này có

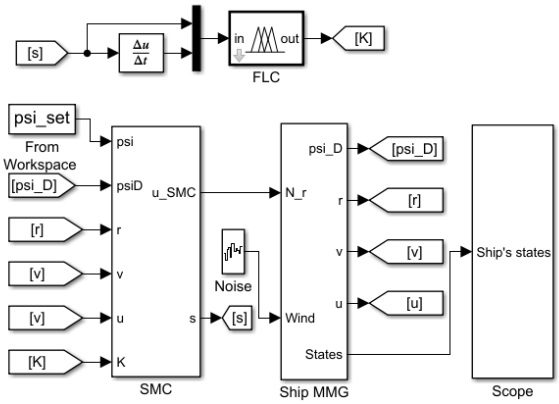
nghĩa là khi biến trượt s âm lớn (hệ thống ở xa mặt trượt và di chuyển theo hướng ngược lại), bộ điều khiển mờ sẽ tăng mạnh hệ số khuếch đại K để nhanh chóng đưa hệ thống về mặt trượt.

- $-5 < s < +5$ (vùng gần 0): ΔK gần bằng 0. Điều này có nghĩa là khi hệ thống ở gần mặt trượt (s gần 0), bộ điều khiển mờ sẽ giữ nguyên hoặc thay đổi rất ít hệ số khuếch đại K để tránh chattering.

Từ các công thức (5÷9) mô hình Simulink của bộ điều khiển SMC được được thiết kế như Hình 7. Cấu trúc điều khiển hệ thống giữ hướng với bộ điều khiển FSMC Hình 8.



Hình 7. Cấu trúc thiết kế bộ điều khiển SMC trên simulink.



Hình 8. Cấu trúc mô phỏng bộ ổn định hướng cho tàu thủy với bộ điều khiển FSMC.

Tín hiệu sai lệch của hướng đi sẽ được đưa vào khối SMC để tính toán ra tín hiệu điều khiển u_{SMC}. Bộ điều khiển FLC sẽ điều chỉnh hệ số khuếch đại K cho khối SMC. Tín hiệu hồi tiếp góc lái ψ_d sẽ được lấy để tính toán sai lệch điều khiển của hệ thống.

4. Kết quả mô phỏng

Mô hình MMG của tàu được xây dựng bằng m-file theo các phương trình (1), (2), (3) và (4), thông số tàu [13] được cho trong Bảng 2.

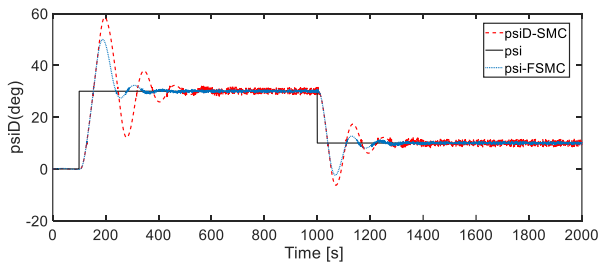
Bảng 2. Bộ thông số tàu.

Thông số	Giá trị
L	103 (m)
d	15.6 (m)
m	46.10^5 (kg)
Xu	-0.5012
XP	0.183
Yv	0.2496
Yr	0.0542
Nr	-0.0488
Nv	-0.0782
Nr	-0.0430
NR	-0.0480
Iz	$2,54.10^9$

Mô phỏng bộ điều khiển giữ hướng cho tàu thủy với tín hiệu đặt ψ dạng bước nhảy đơn vị.

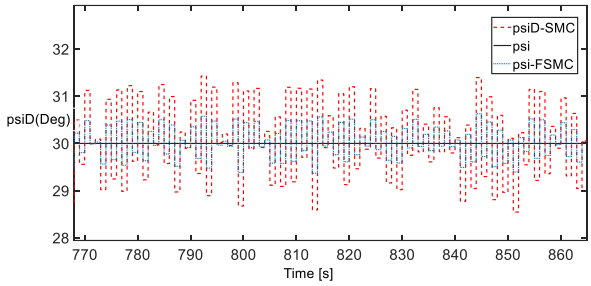
Trong khoảng thời gian 100 giây đến 1000 giây tàu bẻ lái sang phải 30^0, từ sau 100 giây đến 2000 giây, tàu bẻ lái sang trái 20^0 hướng đi khi đó còn 10^0. Kết quả mô phỏng với các bộ điều khiển SMC truyền thống và FSMC được thể hiện trên Hình 9.

Đường nét liên mô tả giá trị đặt Ψ, đường nét đứng màu đỏ mô tả đáp ứng của bộ điều khiển SMC truyền thống, đường nét đứt mầu xanh mô tả đáp ứng của bộ điều khiển FSMC.



Hình 9. So sánh đáp ứng của bộ điều khiển SMC truyền thống và FSMC.

Với bộ điều khiển SMC có độ quá điều chỉnh khá lớn khi tín hiệu đặt thay đổi. Có hiện tượng dao động (chattering) liên tục quanh giá trị đặt Trong khi đó với bộ điều khiển FSMC có độ quá điều chỉnh, nhưng nhỏ hơn đáng kể so với SMC. Thời gian xác lập cũng nhanh hơn so với SMC và gần như không có chattering điều này có thể thấy rõ hơn khi phóng to đáp ứng ở đoạn dao động như Hình 10.



Hình 10. So sánh biên độ chattering giữa bộ điều khiển SMC và FSMC.

Chất lượng của bộ điều khiển SMC và FSMC, được đánh giá bằng sai số tuyệt đối trung bình MAE (Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \qquad (11)$$

Trong đó:

- n: là số mẫu kiểm tra
- y_i là mẫu thứ i của đáp ứng
- $\hat{y}_i$ là mẫu thứ i giá trị đặt

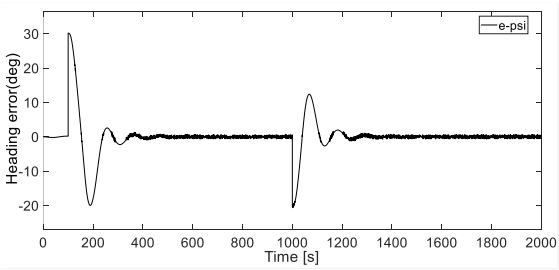
Kết quả so sánh đáp ứng của 2 bộ điều khiển được cho trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh đáp ứng của bộ điều khiển SMC và FSMC trong khoảng thời gian từ 0-1000s.

Bộ điều khiển	MAE	Độ quá chỉnh	Thời gian xác lập
SMC	4.371(deg)	83.3%	~350s
FSMC	2.417 (deg)	60.0%	~300s

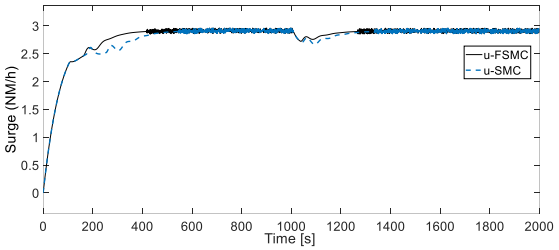
Từ kết quả trên cho thấy bộ điều khiển FSMC có độ quá điều chỉnh thấp hơn 23.3% so với bộ điều khiển SMC, thời gian xác lập cũng nhanh hơn 50 giây so với SMC còn sai lệch điều khiển của FSMC thấp hơn SMC khoảng 50%. Điều đó cho thấy chất lượng của bộ điều khiển FSMC đã cải thiện hơn so với SMC truyền thống.

Sai lệch điều khiển của bộ điều khiển FSMC được chỉ ra như trên Hình 11. Kết quả cho thấy bộ điều khiển FSMC bám tín hiệu đặt rất tốt. Sau mỗi lần thay đổi tín hiệu đặt, hệ thống chỉ mất khoảng vài chục giây để ổn định trở lại.



Hình 11. Sai lệch góc hướng đi so với giá trị đặt của bộ điều khiển FSMC.

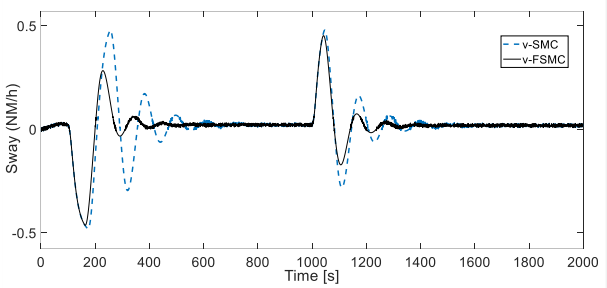
Giá trị vận tốc dọc của tàu (*u)* được mô tả trên Hình 12. Trong giai đoạn đầu (0 - 200 giây) tàu bắt đầu từ trạng thái đứng yên. Giai đoạn 200 - 1000 giây vận tốc dọc duy trì tương đối ổn định trong khoảng từ 2.9 đến 3 hải lý/giờ. Thời điểm 1000 giây vận tốc dọc của tàu giảm do tàu thực hiện bẻ lái sang phải tại thời điểm này. Khi tàu bẻ lái, bánh lái tạo ra lực cản, làm giảm tốc độ của tàu.



Hình 12. Giá trị vận tốc dọc (u) của tàu.

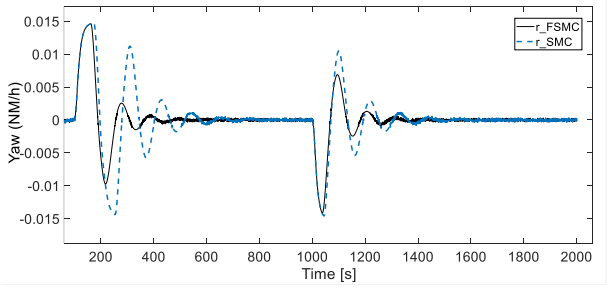
Vận tốc ngang (*v)* của tàu thể hiện trong Hình 13. Thời điểm 100 giây và 1000 giây, tàu thực hiện bẻ lái, bánh lái tạo ra một lực ngang đẩy tàu sang phải. Điều này làm cho v tăng lên dương. Sau đó, do quán tính và tác động của dòng chảy, tàu bị trôi dạt sang trái (*v* âm). Bộ điều khiển FSMC phản ứng để đưa tàu về hướng đi mong muốn, làm cho *v* dao động và

cuối cùng ổn định về 0. Bộ điều khiển SMC cũng điều khiển theo cách tương tự tuy nhiên tốc độ bám chậm hơn, điều này thấy rõ tại thời điểm bẻ lái.



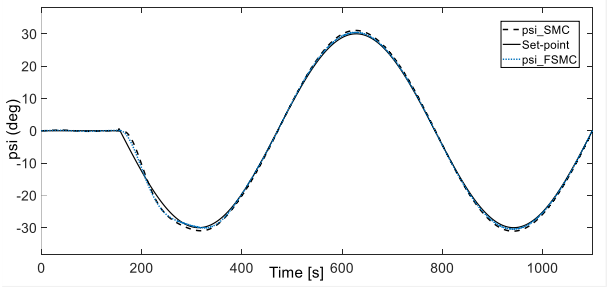
Hình 13. Giá trị vận tốc ngang (v) của tàu.

Vận tốc quay trở của tàu được mô tả trên Hình 14. Thời điểm 100 giây tàu được yêu cầu rẽ phải, bộ điều khiển FSMC tạo ra mô-men lái để làm cho tàu quay theo hướng mong muốn. Vận tốc quay trở (*r*) tăng lên dương thể hiện tàu đang quay phải. Sau đó, do quán tính và để bám theo tín hiệu đặt, *r* chuyển sang âm (tàu quay trái để điều chỉnh lại) và cuối cùng ổn định về 0 khi tàu đạt được hướng đi mong muốn. Thời điểm 1000 giây góc đặt chuyển từ 30^0 sang 10^0, tàu được bẻ lái sang trái tạo ra tín hiệu ngược lại so với thời điểm 100 giây.



Hình 14. Giá trị vận tốc quay (r) của tàu.

Thử nghiệm với hướng đi dạng hình *sin* như trên Hình 15.



Hình 15. Đáp ứng của bộ điều khiển với giá trị đặt dạng hình sin.

Cả hai bộ điều khiển SMC và FSMC đều bám theo giá trị đặt khá tốt. Tuy nhiên, nếu quan sát kỹ, đặc biệt là ở những đoạn có sự thay đổi nhanh hoặc ở đỉnh hoặc đáy của đường cong, có thể thấy đường chấm xanh (đáp ứng của FSMC) bám sát đường giá trị đặt (Set-point) hơn so với đường đứt đen (đáp ứng của SMC).

Lượng hóa sai lệch của 2 loại bộ điều khiển bằng chỉ số MEA, cho kết quả MEA của SMC và FSMC lần lượt là 0.771844 và 0.438752, điều này đã lượng hóa sự khác biệt, xác nhận rằng FSMC đạt được hiệu suất bám trung bình tốt hơn SMC.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày việc thiết kế bộ điều khiển trượt mờ cho hệ thống giữ hướng của tàu thủy dựa trên mô hình MMG. Bộ điều khiển này kết hợp ưu điểm của điều khiển trượt về tính ổn định và mạnh mẽ với khả năng xử lý thông tin mờ của điều khiển mờ, giúp giảm thiểu hiện tượng chattering và tăng cường khả năng chống nhiễu.

Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho thấy bộ điều khiển FSMC có khả năng bám quỹ đạo tốt, thời gian đáp ứng nhanh, độ vọt lố nhỏ, sai số xác lập thấp so với bộ điều khiển trượt truyền thống

Nghiên cứu này đóng góp vào việc nâng cao hiệu quả và độ tin cậy của hệ thống điều khiển tàu thủy trong các điều kiện hoạt động thực tế.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Văn Tiến: Nghiên cứu xây dựng mô hình MMG tàu thủy, thiết kế bộ điều khiển. **Đỗ Khắc Tiệp:** Xây dựng mô hình mô phỏng, tổng hợp kết quả. **Trần Sinh Biên:** Đánh giá dữ liệu mô phỏng, chỉnh sửa bản thảo.

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 được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Hàng Hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT 24.25.60

1st Nguyễn Văn Tiến*. *Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam*
2nd Đỗ Khắc Tiệp. *Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam*
3rd Trần Sinh Biên. *Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam*
*Corresponding author:
nguyenvantien@vimaru.edu.com

Tài liệu tham khảo

[1] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed., Research Triangle Park, NC, USA: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995. [Online]. Available: https://aiecp.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf.

[2] F. L. Lewis, D. L. Vrabie, and V. L. Syrmos, *Optimal Control*, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012, https://www.wiley.com/en-us/Optimal+Control%2C+3rd+Edition-p-9780470633496.

[3] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011. doi: 10.1002/9781119994138.

[4] Y. B. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding Mode Control and Observation*, New York, NY, USA: Springer, 2014. [Online]. Available: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-0-8176-4893-0.pdf.

[5] Ali J. Koshkouei, Yannick Law and Keith J. Burnham, "Sliding mode and PID controllers for ship roll stabilisation: A comparative simulation study," *16th Triennial World Congress*, Prague, Czech Republic, 2005, pp. 75–12. doi: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01943.

[6] Witold Gierusz, Andrzej Lebkowski, Roman Smierzchalski, "Multivariable robust steering of the ship with feedforward controller," *IFAC Proceedings Volume 40, Issue 17, 2007, pp. 310-314*. doi: 10.3182/20070919-3-HR-3904.00055

[7] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 3rd ed., Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010. [Online]. Available: https://home.iitk.ac.in/~avrs/ManyValuedLogic/FuzzyLogicforEngineers.pdf.

[8] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

[9] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, Jan. 1975. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

[10] Shyh-Leh Chen, Wei-Chih Hsu, "Fuzzy Sliding Mode Control For Ship Roll Stabilization," *Asian Journal of Control: Vol. 5 Issue 2, pp. 168-333*, 2008, doi: 10.1111/j.1934-6093.2003.tb00110.x.

[11] Phí Hoàng Nhã, Nguyễn Đăng Hải, "Adaptive fuzzy sliding mode control for three degrees of freedom robot rp," Tạp chí Khoa học & Công nghệ, vol. 58 no. 6B, pp. 19-22, 2022, 10.57001/huih5804.81.

[12] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23–36, Feb. 1993. doi: 10.1109/41.184818.

[13] N.-K. Im and V.-S. Nguyen, "Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 3 pp. 235–249, 2018, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2017.08.003.