

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO BÀI TOÁN GIỮ ĐỘI HÌNH VÀ BẮM QUỸ ĐẠO CỦA AUV

DESIGN OF SLIDING MODE CONTROLLER FOR FORMATION KEEPING AND TRAJECTORY TRACKING OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

ĐỖ KHẮC TIỆP*, NGUYỄN VĂN TIẾN, TÓNG LÂM TÙNG

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

**Email liên hệ: dokhactiep@vimaru.edu.vn*

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.937>

Tóm tắt

Bài báo đề xuất giải pháp điều khiển chế độ trượt (SMC) để giải quyết đồng thời bài toán bám quỹ đạo và duy trì đội hình cho hệ thống AUV theo cấu trúc Leader-Follower. Nghiên cứu được xây dựng trên mô hình động lực học 6 bậc tự do (6-DOF) đầy đủ, xem xét đến các yếu tố bất định và nhiễu môi trường thủy động lực. Để khắc phục hiện tượng rung vốn là nhược điểm lớn nhất của bộ điều khiển SMC truyền thống gây hại cho cơ cấu chấp hành, nhóm tác giả đã đề xuất cải tiến luật điều khiển bằng cách sử dụng hàm tanh thay thế cho hàm dấu (sign). Giải pháp này giúp làm trơn tín hiệu điều khiển mà vẫn đảm bảo tính ổn định tiệm cận toàn cục theo lý thuyết Lyapunov. Kết quả mô phỏng trên các quỹ đạo đường thẳng và hình sin cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, AUV Follower bám sát AUV Leader chính xác và sai số hội tụ nhanh về 0.

Từ khóa: Điều khiển đội hình, AUV, Sliding Mode Control, điều khiển bền vững, điều khiển đa tác tử.

Abstract

This paper proposes a Sliding Mode Control (SMC) approach to simultaneously address trajectory tracking and formation keeping problems for (AUV) systems based on a Leader-Follower structure. The study is developed based on a full 6-DOF dynamic model, taking into account model uncertainties and hydrodynamic environmental disturbances. To mitigate the chattering phenomenon a major drawback of traditional SMC that negatively affects actuators the authors propose an improved control law by substituting the traditional sign function with the tanh function. This solution smooths the control signal while ensuring global asymptotic stability according to Lyapunov theory. Simulation results for both straight line and

sinusoidal trajectories demonstrate stable system performance, where the Follower AUV accurately tracks the Leader AUV, and tracking errors rapidly converge to zero.

Keywords: Formation control, AUV, Sliding Mode Control, Robust control, Multi-agent control.

1. Giới thiệu

Bài báo này đề xuất một chiến lược điều khiển bền vững cho hệ thống đa tàu lặn tự hành (AUV) dựa trên cấu trúc Dẫn đường - Bám đuôi (Leader-Follower), một hướng tiếp cận nền tảng cho các AUV thiếu cơ cấu chấp hành [1]. Trong bối cảnh môi trường dưới nước chứa đựng nhiều yếu tố bất định và thách thức phi tuyến tính [2], việc xây dựng mô hình động lực học 6 bậc tự do (6-DOF) chính xác là cơ sở quan trọng để mô tả chuyển động của phương tiện [3].

Dựa trên nguyên lý dẫn đường bám quỹ đạo [4], nghiên cứu giải quyết đồng thời bài toán bám quỹ đạo cho tàu Leader và duy trì đội hình cho tàu Follower. Để đối phó với sự ghép nối mạnh giữa các kênh chuyển động và sự bão hòa của cơ cấu chấp hành, phương pháp tách kênh điều khiển được áp dụng để đơn giản hóa quá trình thiết kế [5]. Bộ điều khiển chế SMC được lựa chọn làm nòng cốt nhờ khả năng mạnh mẽ trong việc xử lý các sai số mô hình [6].

Tuy nhiên, nhược điểm lớn nhất của bộ điều khiển SMC là hiện tượng rung (chattering) gây hại cho thiết bị [7]. Kế thừa các nỗ lực giảm thiểu chattering cho phương tiện biển trong các nghiên cứu trước đây [8], [9], bài báo đề xuất một cải tiến mới bằng cách sử dụng hàm tangent hyperbolic (tanh) thay thế cho hàm dấu trong mặt trượt [10]. Giải pháp này giúp làm trơn tín hiệu điều khiển mà vẫn đảm bảo tính bền vững (robustness) của hệ thống trước dòng chảy và nhiễu động [11]. Tính ổn định toàn cục của hệ thống kín được phân tích và chứng minh chặt chẽ dựa trên lý thuyết Lyapunov [12]. Kết quả mô phỏng số kiểm

chúng hiệu quả vượt trội của thuật toán đề xuất trong việc duy trì đội hình chính xác và triệt tiêu dao động không mong muốn.

2. Mô hình toán học

2.1. Mô hình động học của AUV

Giả sử AUV là một vật rắn tuyệt đối, trạng thái của AUV được biểu diễn bởi các vector sau:

Vector vị trí và góc Euler (trong hệ {E}- hệ tọa độ NED): $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$.

Trong đó: (x, y, z) là tọa độ vị trí; (ϕ, θ, ψ) lần lượt là các góc nghiêng (roll), góc chúi (pitch) và góc hướng (yaw).

Vector vận tốc tuyến tính và vận tốc góc (trong hệ {B}- được gắn trên thân của AUV): $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$. Trong đó: (u, v, w) là vận tốc dài dọc theo các trục x_B, y_B, z_B ; (p, q, r) là vận tốc góc quay quanh các trục tương ứng.

Mô hình động học của AUV 6 bậc tự do biểu diễn mối quan hệ giữa vận tốc trong hệ tọa độ gắn với thân và tốc độ thay đổi vị trí trong hệ tọa độ NED được mô tả bởi phương trình (1).

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} + \mathbf{v}_c \quad (1)$$

Với: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ là vector vị trí và góc Euler; $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$ là vector vận tốc trong hệ thân; $\mathbf{v}_c = [V_x, V_y, V_z, 0, 0, 0]^T$ là vector vận tốc dòng chảy.

Trong phương trình động học (1), $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ là ma trận biến đổi bao gồm hai thành phần chính: ma trận quay tuyến tính và ma trận chuyển đổi vận tốc góc, được định nghĩa dưới dạng ma trận khối như phương trình (2).

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n \boldsymbol{\Theta} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T} \boldsymbol{\Theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

với $\mathbf{R}_b^n$ là ma trận quay từ hệ thân sang hệ NED và được định nghĩa như phương trình (3).

$$\mathbf{R}_b^n = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi) \quad (3)$$

Thành phần ma trận chuyển đổi vận tốc góc $\mathbf{T}(\boldsymbol{\Theta})$, đóng vai trò liên kết giữa vector vận tốc góc trong hệ quy chiếu gắn trên thân AUV (p, q, r) và đạo hàm theo thời gian của các góc Euler $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$, được xác định bởi công thức (4).

$$\mathbf{T}(\boldsymbol{\Theta}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. Mô hình động lực học của AUV

Phương trình động lực học của AUV 6 bậc tự do mô tả các lực và momen tác động lên tàu, tuân theo định luật Newton-Euler. Phương trình cân bằng lực tổng quát được biểu diễn dưới dạng ma trận như phương trình (5).

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

Trong đó: $\mathbf{M}$ - ma trận khối lượng và quán tính; $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ - ma trận các lực Coriolis và lực hướng tâm; $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ - ma trận suy giảm, đại diện cho lực cản nhớt tuyến tính và phi tuyến của nước; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ - Vector các lực hồi phục (trọng lực và lực đẩy Archimedes);

$\boldsymbol{\tau}_d$ - nhiễu môi trường; $\boldsymbol{\tau}$ - vector lực và momen điều khiển đầu vào.

Trong phạm vi nghiên cứu này, đối tượng được xem xét là các AUV thuộc lớp thiếu cơ cấu chấp hành. Điều này có nghĩa là số lượng tín hiệu điều khiển ít hơn số bậc tự do của hệ thống. Cụ thể, AUV không có động cơ để điều khiển trực tiếp chuyển động ngang và xoay nghiêng. Do đó, vector lực điều khiển $\boldsymbol{\tau}$ được cấu hình như biểu thức (6).

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_u, 0, \tau_w, 0, \tau_q, \tau_r]^T \quad (6)$$

2.3. Quan hệ đội hình của điều khiển đa tác tử cho AUV

Trong bài toán điều khiển đội hình đa tác tử cho AUV, nghiên cứu này áp dụng cấu trúc dẫn đường - bám đuôi (Leader-Follower). Đây là một trong những chiến lược phổ biến nhất hiện nay bên cạnh các cấu trúc khác như cấu trúc ảo hay dựa trên hành vi, nhờ vào ưu điểm vượt trội về tính đơn giản trong thiết kế và khả năng mở rộng linh hoạt của hệ thống. Cơ chế hoạt động của cấu trúc này được phân cấp như sau:

AUV Leader: Có nhiệm vụ bám theo một quỹ đạo tham chiếu toàn cục đã được định trước. Trạng thái của Leader đóng vai trò là tín hiệu tham chiếu động cho các tàu đi theo.

AUV Follower: Không bám theo quỹ đạo toàn cục một cách trực tiếp mà điều chỉnh trạng thái của mình để duy trì một vị trí tương đối (khoảng cách và góc hướng) so với AUV Leader.

Trong khuôn khổ của lý thuyết điều khiển đa tác tử, nghiên cứu này áp dụng chiến lược điều khiển phân cấp. Hệ thống đa tác tử được mô hình hóa dưới dạng đồ thị có hướng, trong đó thông tin trạng thái truyền một chiều từ Leader sang Follower. Cụ thể, bài toán điều khiển đội hình được giải quyết bằng cách quy về bài toán bám quỹ đạo động. Đối với AUV Leader, mục tiêu là triệt tiêu sai số bám giữa trạng thái thực và quỹ

đạo toàn cục ($\lim_{t \rightarrow \infty} (\eta_L - \eta_{ref}) = 0$). Đối với AUV Follower, quỹ đạo tham chiếu không cố định mà là một hàm của trạng thái Leader theo thời gian thực. Quan hệ phối hợp giữa các tác tử được xác định bởi vector sai lệch đội hình $E_{form} = [L, \psi_{ref}, \Delta z]^T$.

Việc điều khiển đa tác tử cho AUV để duy trì đội hình Leader-Follower, vị trí mong muốn của AUV Follower (x_f^d, y_f^d, z_f^d) được xác định dựa trên trạng thái của Leader (x_L, y_L, z_L, ψ_L) và các tham số hình học đội hình (khoảng cách L , góc lệch β). Các phương trình quan hệ được thiết lập như biểu thức (7-10).

Vị trí ngang mong muốn của Follower được miêu tả như phương trình (7) và (8).

$$x_f^d = x_L + L \cos(\psi_L + \beta) \quad (7)$$

$$y_f^d = y_L + L \sin(\psi_L + \beta) \quad (8)$$

Độ sâu và tư thế mong muốn được miêu tả như các phương trình (9), (10).

$$z_f^d = z_L + \Delta z \quad (9)$$

$$\phi_f^d = \phi_L; \theta_f^d = \theta_L; \psi_f^d = \psi_L \quad (10)$$

Trong đó Δz là độ chênh lệch độ sâu mong muốn giữa hai AUV, và Follower được yêu cầu duy trì hướng đi (ψ) đồng bộ với Leader.

3. Thiết kế bộ điều khiển

Mục tiêu của bộ điều khiển là tạo ra các lực và mô-men đẩy ($\tau_u, \tau_w, \tau_q, \tau_r$) sao cho trạng thái của AUV bám theo trạng thái tham chiếu. Dựa trên mô hình động lực học 6-DOF đã trình bày tại Mục 2.1, hệ thống được tách thành các kênh điều khiển độc lập để đơn giản hóa quá trình thiết kế bao gồm: kênh tốc độ dọc (Surge), kênh độ sâu (Heave/Pitch), và kênh hướng (Yaw).

Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển đa tác tử cho AUV thực hiện điều khiển giữ đội hình theo hàng dọc và bám theo quỹ đạo đặt được mô tả như Hình 1.

Hệ thống được tổ chức theo cấu trúc điều khiển phân cấp Leader-Follower, trong đó AUV dẫn đầu bám theo quỹ đạo tham chiếu toàn cục và AUV theo sau điều chỉnh trạng thái để duy trì đội hình tương đối dựa trên trạng thái của Leader. Cả hai vòng lặp đều sử dụng bộ điều khiển chế độ trượt (SMC) để đảm bảo tính bền vững trước nhiễu môi trường và động lực học phi tuyến. Sự phối hợp giữa hai AUV được thực hiện thông qua khối logic chuyển đổi, tính toán quỹ đạo đặt cho Follower dựa trên các tham số hình học đội hình mong muốn.

3.1. Định nghĩa sai số và mặt trượt

Nguyên lý cơ bản của điều khiển trượt (SMC) là buộc trạng thái hệ thống di chuyển về và trượt trên một mặt phẳng pha định trước. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả định nghĩa các mặt trượt S dựa trên sai số vận tốc và sai số vị trí, nhằm đảm bảo cả hai yếu tố này cùng hội tụ về 0. Các mặt trượt cho bốn kênh điều khiển được thiết kế như sau:

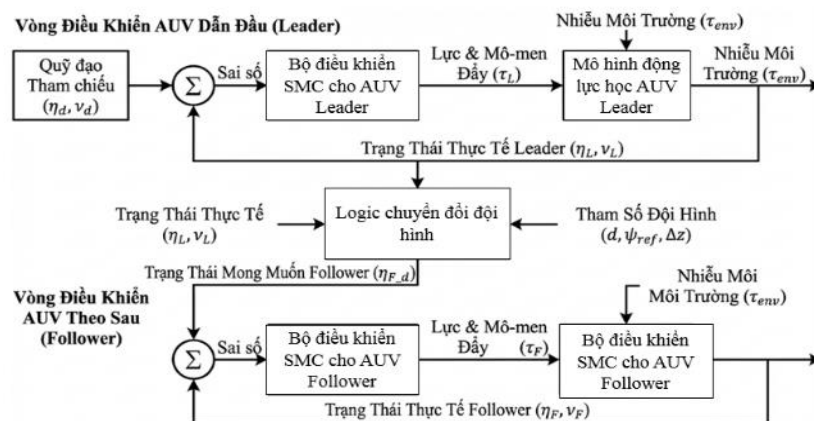
* *Kênh tốc độ dọc (Surge - u)*: Mục tiêu là bám vận tốc dài u_d . Mặt trượt su được chọn là tổ hợp tuyến tính của sai số vận tốc và sai số vị trí dọc trực thân như biểu thức (11).

$$S_u = (u - u_d) + \lambda_u e_{x_b} \quad (11)$$

Trong đó: u, u_d - là vận tốc dọc trực thực tế và mong muốn; e_{x_b} - là sai số vị trí được qui đổi về hệ trục trên thân AUV; $\lambda_u > 0$ là hệ số trọng số mặt trượt.

* *Kênh độ sâu (Heave - w)*: Để điều khiển độ sâu z , ta tác động vào vận tốc thẳng đứng w như biểu thức (12).

$$S_w = w + \lambda_w (z - z_d) \quad (12)$$



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điều khiển giữ đội hình cho theo luật Leader-Follower

Trong đó: z, z_d là độ sâu thực tế và độ sâu mong muốn.

* Kênh góc nghiêng (Pitch - q): Để ổn định góc nghiêng θ (giữ cân bằng cho AUV), mặt trượt được thiết kế dựa trên vận tốc góc θ như (13).

$$S_q = q + \lambda_q(\theta - \theta_d) \quad (13)$$

* Kênh góc hướng (Yaw - r): Để bám theo hướng đi mong muốn ψ_d , mặt trượt S_r được định nghĩa như (14).

$$S_r = r + \lambda_r(\psi - \psi_d) \quad (14)$$

3.2. Luật điều khiển SMC

Một nhược điểm lớn của bộ điều khiển trượt truyền thống là hiện tượng rung (chattering) do sử dụng hàm dấu gián đoạn $\text{sgn}(S)$. Điều này gây hại cho hệ thống đẩy cơ khí của AUV. Để khắc phục, nhóm tác giả đề xuất sử dụng hàm tanh để làm trơn tín hiệu điều khiển trong lớp ranh giới.

Luật điều khiển đầu ra τ được đề xuất như (15).

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_w \\ \tau_q \\ \tau_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_u \tanh(S_u) \\ -K_w \tanh(S_w) \\ -K_q \tanh(S_q) \\ -K_r \tanh(S_r) \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.3. Phân tích tính ổn định

Xét hàm ứng viên Lyapunov dương xác định cho kênh thứ i bất kỳ:

$$V_i = \frac{1}{2} S_i^2$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov theo thời gian:

$$\dot{V}_i = S_i \dot{S}_i$$

Thay thế động học của hệ thống vào phương trình mặt trượt, ta có dạng tổng quát của $\dot{S}_i$:

$$\dot{S}_i = f_i(\mathbf{x}) + g_i(\mathbf{x})\tau_i$$

Với luật điều khiển $\tau_i = -K_i \tanh(S_i)$, phương

trình trở thành: $\dot{V}_i = S_i [f_i(\mathbf{x}) - g_i(\mathbf{x})K_i \tanh(S_i)]$

Để đảm bảo tính ổn định ($\dot{V}_i < 0$), hệ số khuếch đại K_i phải được chọn đủ lớn để thắng được các thành phần động lực học và nhiễu $f_i(\mathbf{x})$:

$$K_i > \frac{|f_i(\mathbf{x})|}{g_i(\mathbf{x})}$$

Khi điều kiện trên thỏa mãn, $S_i \rightarrow 0$ khi $t \rightarrow \infty$, kéo theo sai số bám hội tụ về 0. Việc sử dụng hàm tanh đảm bảo tính ổn định tiệm cận trong lân cận gốc

tọa độ. Do đó, hệ thống ổn định tiệm cận toàn cục theo tiêu chuẩn Lyapunov.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Thiết lập mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán điều khiển SMC đề xuất, quá trình mô phỏng số được thực hiện dựa trên mô hình động lực học 6 bậc tự do của AUV. Các đặc tính vật lý của phương tiện, bao gồm các thành phần của ma trận khối lượng cùng các hệ số cân thủy động lực học tuyến tính, được thiết lập cụ thể như trong Bảng 1. Bên cạnh đó, cấu hình đội hình mong muốn giữa Leader và Follower được xác định bởi khoảng cách L và góc lệch β .

Bảng 1. Thông số động lực học của AUV

Tham số	Giá trị	Đơn vị
m_{11}	200	Kg
m_{22}	250	Kg
m_{33}	300	Kg
d_{11}	100	kg/s
d_{22}	200	kg/s
d_{33}	150	kg/s
L	10	m
D	0.16	cm
β	pi	

Để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán điều khiển, các tham số thiết kế của bộ điều khiển trượt cho cả AUV Leader và AUV Follower đã được lựa chọn và tinh chỉnh thông qua quá trình mô phỏng. Chi tiết các giá trị hệ số mặt trượt (λ) và hệ số khuếch đại điều khiển (k) cho từng kênh chuyển động được liệt kê cụ thể trong Bảng 2.

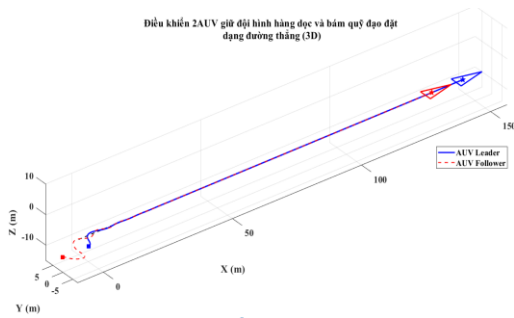
Bảng 2. Thông số của bộ điều khiển SMC

Kênh	Leader (λ/k)	Follower (λ/k)
Surge	0.5/100	0.8/200
Heave	1.0/150	1.2/150
Yaw	1.0/100	1.5/120
Pitch	1.0/80	1.2/80

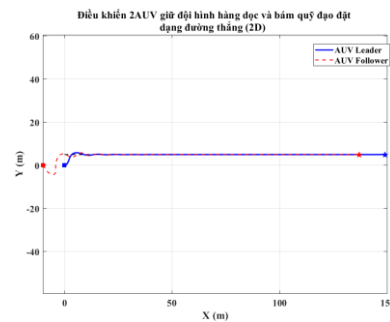
4.2. Kết quả mô phỏng

* Mô phỏng hai AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng đường thẳng

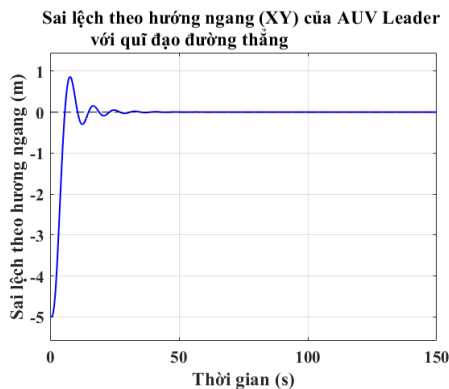
Kết quả mô phỏng đáp ứng quỹ đạo của hệ thống đội hình AUV trong không gian ba chiều với kịch



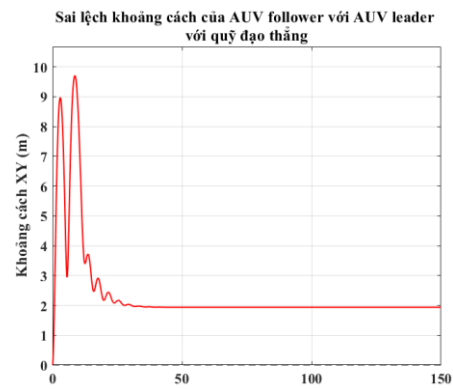
Hình 2. Điều khiển 2 AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng đường thẳng (3D)



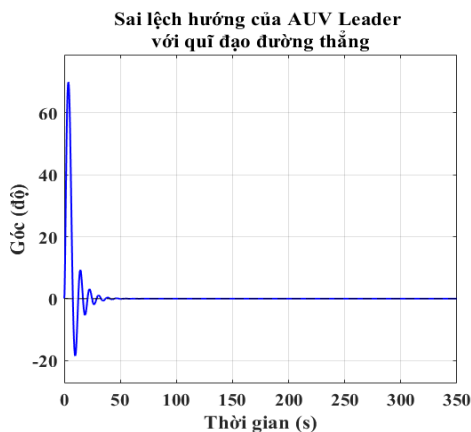
Hình 3. Điều khiển 2 AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng đường thẳng (2D)



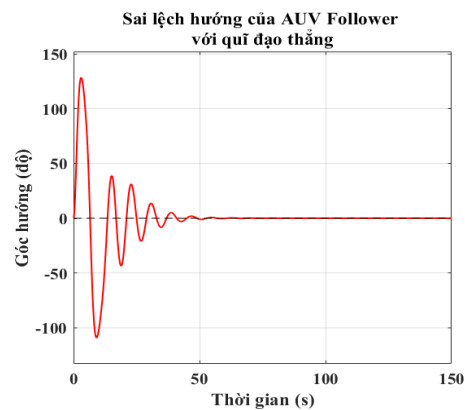
Hình 4. Sai lệch theo hướng ngang (XY) của AUV Leader với quỹ đạo thẳng



Hình 5. Sai lệch khoảng cách của AUV Follower so với AUV Leader với quỹ đạo thẳng



Hình 6. Sai lệch hướng đi của AUV Leader với quỹ đạo thẳng



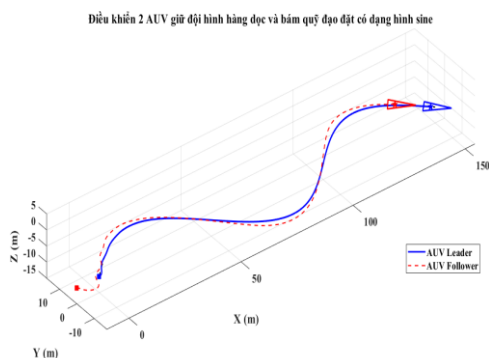
Hình 7. Sai lệch hướng đi của AUV Follower với quỹ đạo thẳng

bản di chuyển theo đường thẳng được thể hiện chi tiết như Hình 2.

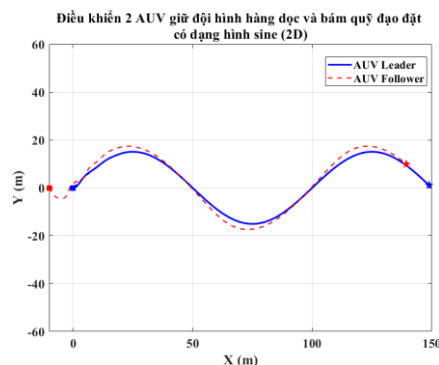
Hình 2 biểu diễn kết quả mô phỏng 3D của hệ thống hai tàu AUV thực hiện nhiệm vụ bám quỹ đạo đường thẳng và giữ đội hình hàng dọc. Đường màu xanh liên tục đại diện cho quỹ đạo của AUV Leader, trong khi đường nét đứt màu đỏ hiển thị hành trình của AUV Follower bám sát phía sau. Từ điểm xuất phát,

cả hai phương tiện nhanh chóng ổn định và duy trì hành trình mượt mà, cho thấy Follower bám chính xác theo Leader mà không xảy ra hiện tượng dao động lớn hay lệch pha.

Hình 3 minh họa đáp ứng quỹ đạo trên mặt phẳng ngang, cho thấy AUV Follower (nét đứt đỏ) bám sát thành công AUV Leader (nét liên xanh) theo cấu trúc đội hình hàng dọc trên quỹ đạo đường thẳng. Sau giai



Hình 8. Điều khiển 2 AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng hình Sin (3D)



Hình 9. Điều khiển 2 AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng hình Sin (2D)

đoạn quá độ ngắn tại thời điểm xuất phát, cả hai phương tiện đều nhanh chóng ổn định hành trình với sai số bám phương ngang gần như triệt tiêu.

Đồ thị Hình 4 cho thấy khả năng đáp ứng nhanh của bộ điều khiển khi sai số bám ngang hội tụ từ mức ban đầu -5m về 0 chỉ trong khoảng 30 giây đầu tiên. Sau giai đoạn quá độ ngắn này, sai lệch được duy trì ổn định ở mức triệt tiêu trong suốt hành trình còn lại.

Đồ thị Hình 5 cho thấy trong khoảng 40 giây đầu tiên, hệ thống trải qua giai đoạn quá độ mạnh với biên độ sai số khoảng cách lên tới gần 10m khi AUV Follower nỗ lực điều chỉnh vị trí để gia nhập đội hình. Sau giai đoạn này, sai lệch nhanh chóng giảm và duy trì ổn định ở mức 2m, cho thấy hệ thống đạt được tính ổn định (hội tụ) nhưng vẫn tồn tại một lượng sai số xác lập nhất định trong kịch bản thử nghiệm này.

Để đánh giá khả năng ổn định hướng của thuật toán điều khiển đề xuất, các Hình 6, 7 trình bày kết quả mô phỏng sai lệch góc hướng theo thời gian đối với cả AUV Leader và AUV Follower khi thực hiện nhiệm vụ bám quỹ đạo dạng đường thẳng.

Dựa trên hai đồ thị sai lệch hướng Hình 6 và 7, có thể thấy cả AUV Leader và Follower đều thể hiện khả năng bám quỹ đạo tốt khi sai số hướng hội tụ về 0 sau khoảng 50 giây. Tuy nhiên, AUV Follower có biên độ dao động ban đầu lớn hơn đáng kể (khoảng -110 đến 130 độ) so với AUV Leader (khoảng -20 đến 70 độ). Điều này là hợp lý vì Follower phải thực hiện hai nhiệm vụ đồng thời: Vừa bám theo trạng thái động của Leader, vừa duy trì vị trí tương đối trong đội hình, dẫn đến phản ứng ban đầu mạnh hơn để triệt tiêu sai số tích lũy.

*** Mô phỏng hai AUV thực hiện giữ đội hình hàng dọc và thực hiện bám quỹ đạo đặt có dạng hình sin**

Để đánh giá toàn diện hơn hiệu suất của bộ điều

khiển đề xuất trong các kịch bản chuyển động phức tạp, các Hình 8 và 9 trình bày kết quả mô phỏng quỹ đạo của đội hình AUV theo hàng dọc khi thực hiện nhiệm vụ bám theo đường dẫn dạng hình Sin trong không gian ba chiều (3D) và mặt phẳng hai chiều (2D).

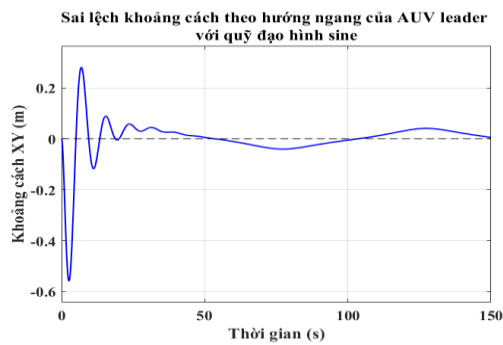
Cả 2 hình mô phỏng trong không gian 2D (Hình 8) và 3D (Hình 9) đều cho thấy khả năng bám quỹ đạo và giữ đội hình tốt của hệ thống điều khiển đề xuất. AUV Leader (đường màu xanh) bám sát quỹ đạo hình sin tham chiếu, trong khi AUV Follower (đường nét đứt đỏ) duy trì vị trí chính xác vị trí trong đội hình hàng dọc, thể hiện qua sự trùng khớp cao giữa hai đường quỹ đạo.

Để đánh giá chi tiết hơn hiệu suất giữ đội hình khi di chuyển trên các quỹ đạo cong, các đồ thị Hình 10 và 11 dưới đây thể hiện sai lệch khoảng cách giữa AUV Leader và Follower, cũng như sai lệch ngang của Leader so với quỹ đạo đặt dạng hình sin.

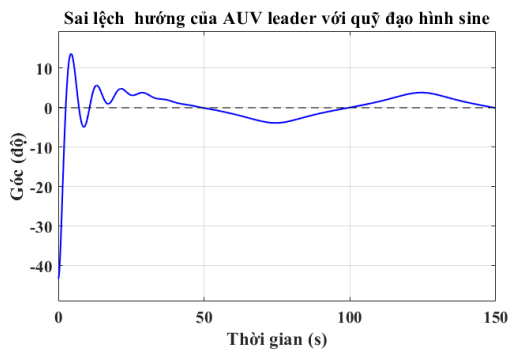
Hình 10 và 11 cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển SMC đề xuất khi đội hình thực hiện bám quỹ đạo hình sin phức tạp. Hình 10 chỉ ra rằng sai lệch ngang của AUV Leader được duy trì ở mức rất thấp sau giai đoạn quá độ ban đầu, chứng tỏ khả năng bám quỹ đạo tốt. Đồng thời, Hình 11 cho thấy sai lệch khoảng cách giữa Leader và Follower hội tụ về một giá trị ổn định (gần với khoảng cách đặt là 10m), mặc dù có dao động nhỏ do tính chất cong liên tục của quỹ đạo hình sin.

Để đánh giá sâu hơn về độ chính xác và tính ổn định của bộ điều khiển trong các điều kiện vận hành phức tạp, các đồ thị Hình 12 và 13 trình bày chi tiết diễn biến sai lệch góc hướng của cả AUV Leader và AUV Follower khi thực hiện nhiệm vụ duy trì đội hình hàng dọc và bám theo quỹ đạo hình sin.

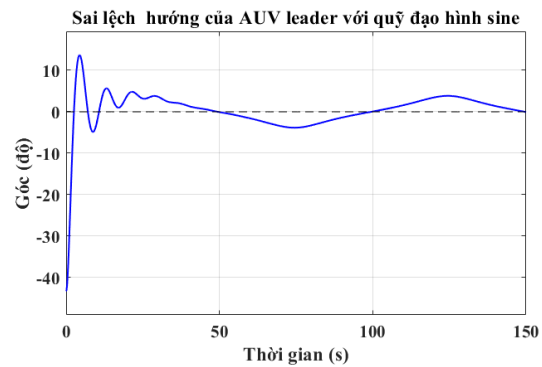
Dựa trên hai đồ thị Hình 12 và 13, có thể thấy khi bám quỹ đạo hình sin, sai lệch hướng của cả AUV



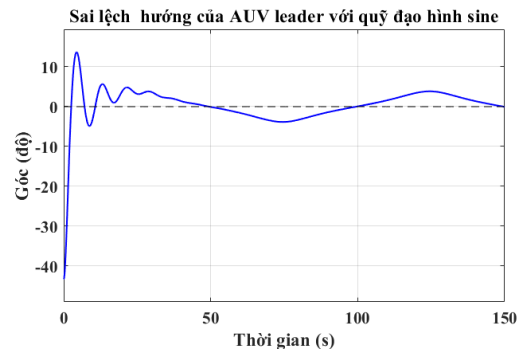
Hình 10. Sai lệch theo hướng ngang (XY) của AUV Leader với quỹ đạo hình Sin



Hình 12. Sai lệch hướng đi của AUV Leader với quỹ đạo hình Sin



Hình 11. Sai lệch hướng của AUV Leader với quỹ đạo hình Sin



Hình 13. Sai lệch hướng đi của AUV Follower với quỹ đạo hình Sin

Leader và Follower đều dao động ổn định quanh mức 0 sau giai đoạn quá độ đầu tiên. Tuy nhiên, biên độ sai số của AUV Follower (khoảng ± 40 độ) lớn hơn nhiều so với AUV Leader (khoảng ± 4 độ). Sự chênh lệch này là hợp lý vì Follower phải chịu tải trọng công việc điều khiển lớn hơn để vừa bám theo trạng thái động của Leader, vừa duy trì vị trí đội hình chính xác trên một quỹ đạo cong liên tục thay đổi.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã giải quyết thành công bài toán điều khiển phối hợp giữ đội hình cho hệ thống đa phương tiện lặn tự hành (AUV) dựa trên cấu trúc Dẫn đường - Bám đuôi (Leader-Follower). Dựa trên mô hình động lực học phi tuyến 6 bậc tự do (6-DOF) đầy đủ của AUV, xem xét đến các yếu tố bất định và nhiễu môi trường, một chiến lược điều khiển mạnh mẽ đã được đề xuất. Các đóng góp chính của nghiên cứu bao gồm:

Xây dựng thành công kiến trúc điều khiển phân cấp, trong đó AUV Leader chịu trách nhiệm bám quỹ đạo toàn cục và AUV Follower điều chỉnh trạng thái để duy trì vị trí hình học tương đối trong đội hình.

Thiết kế các bộ điều khiển chế độ trượt (SMC)

riêng biệt cho từng kênh chuyển động (dọc, trôi/lặn, nghiêng, hướng) của cả tàu dẫn đầu và tàu bám đuôi.

Cải tiến luật điều khiển SMC bằng cách sử dụng hàm tanh thay cho hàm sign truyền thống, giúp loại bỏ hiện tượng rung có hại cho cơ cấu chấp hành trong khi vẫn đảm bảo tính bền vững của hệ thống. Tính ổn định toàn cục của hệ thống kín đã được chứng minh chặt chẽ dựa trên lý thuyết Lyapunov.

Kết quả mô phỏng số trên các kịch bản đường thẳng và hình sin đã khẳng định tính đúng đắn và hiệu quả của thuật toán đề xuất. Hệ thống cho thấy khả năng bám quỹ đạo chính xác với sai số hội tụ về 0 nhanh chóng, đồng thời duy trì ổn định cự ly và góc hướng của đội hình trước các tác động của nhiễu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.61**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cui, R., et al. (2010), *Leader-follower formation control of underactuated AUVs with nonlinear observer*, Automatica, Vol.46, pp.1928-1936.
- [2] Yuh, J. (2000), *Design and control of autonomous*

- underwater robots: A survey*, Autonomous Robots, Vol.9(1), pp.7-24.
- [3] Fossen, T. I. (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons.
- [4] Breivik, M., & Fossen, T. I. (2005), *Principles of guidance-based path following in 2D and 3D*, IEEE Conf. Decision Control, pp.627-634.
- [5] Vu, Q.V.; Dinh, T.A.; Nguyen, T.V.; Tran, H.V.; Le, H.X.; Pham, H.V.; Kim, T.D.; Nguyen, L (2021), *An Adaptive Hierarchical Sliding Mode Controller for Autonomous Underwater Vehicles*, Electronics, Vol.10, p. 2316.
- [6] Edwards, C., & Spurgeon, S. (1998), *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, Taylor & Francis.
- [7] Slotine, J.J. E., & Li, W. (1991), *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall.
- [8] Huadong Zhou, Xiangyang Mu. (2024), *Trajectory Tracking Control of Remotely Operated Vehicles via a Fast-Sliding Mode Controller with a Fixed-Time Disturbance Observer*, Applied Sciences, Vol.14(6), p. 2533.
- [9] Soylu, S., et al. (2008), *Underwater vehicle positioning via chattering-free sliding mode control*, Ocean Engineering, Vol.35(17-18), pp.1762-1773.
- [10] Juan Li, Zhenyang Tian, Honghan Zhang and Wenbo Li (2023), *Robust Finite-Time Control of a Multi-AUV Formation Based on Prescribed Performance*, J. Mar. Sci. Eng, Vol.11(5), p. 897.
- [11] Faheem Ur Rehman, Enrico Anderlini, Giles Thomas (2021), *Leader Follower Formation Control for Underwater Transportation Using Multiple Autonomous Underwater Vehicles*, The International Journal of Maritime Engineering 163(A3).
- [12] Long He, Ya Zhang, Shizhong Li, Bo Li, Mengting Xie, Zehui Yuan and Chenrui Bai (2025), *Formation Control of Underactuated AUVs Based on Event-Triggered Communication and Fractional-Order Sliding Mode Control*, Fractal Fract, Vol.9(12), p. 755.

Ngày nhận bài:	17/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	06/01/2026
Ngày duyệt đăng:	19/01/2026