



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.2026.vn.6.5.112-125>

***Corresponding author:**

Email address:

dokhactiep@vamaru.edu.vn

Received: 06/01/2026

Received in Revised Form:
13/07/2026

Accepted: 12/08/2026

Design of Fuzzy Logic Controller for AUV Formation based on Leader-Follower Strategy

Do Khac Tiep*, Nguyen Van Tien

Faculty of Electrical – Electronics, Vietnam Maritime University, Vietnam

Abstract: This paper presents the design of a Fuzzy Logic Controller (AFLC) for the Leader-Follower formation control of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs). Due to the highly nonlinear dynamics of AUV models and the uncertainties caused by hydrodynamic disturbances, conventional controllers (such as PID) often exhibit limitations in tracking accuracy and response performance. To address these challenges, an Adaptive Fuzzy Logic Controller is proposed for the Follower AUV to enhance tracking quality. The controller utilizes distance error and relative heading error as inputs to directly regulate the vehicle's surge velocity and yaw rate. The effectiveness of the proposed algorithm is validated through simulations in MATLAB/Simulink. The results demonstrate that the system maintains a stable formation with precise trajectory tracking and achieves significantly improved response speeds compared to conventional methods.

Keywords: AUV, Multi-agent control, Fuzzy logic, Leader-Follower strategy, Formation.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.112-125>

***Tác giả liên hệ:**
Địa chỉ Email:
dokhactiep@vamaru.edu.vn

Ngày nộp bài: 06/01/2026
Ngày nộp bài sửa: 13/07/2026
Ngày chấp nhận: 12/08/2026

Thiết kế bộ điều khiển Logic mờ cho đội hình AUV theo mô hình Leader-Follower

Đỗ Khắc Tiếp*, Nguyễn Văn Tiến
Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Tóm tắt: Bài báo này trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển Logic mờ giải quyết bài toán điều khiển đội hình cho nhóm phương tiện tự hành dưới nước (AUV) theo cấu trúc Leader-Follower. Do đặc tính phi tuyến mạnh của mô hình động lực học AUV và sự tác động bất định của nhiễu thủy động lực học, các bộ điều khiển kinh điển (như PID) thường bộc lộ hạn chế về độ chính xác và khả năng đáp ứng. Để khắc phục vấn đề này, một bộ điều khiển Logic mờ được đề xuất cho AUV Follower nhằm nâng cao chất lượng bám. Bộ điều khiển sử dụng đầu vào là sai số khoảng cách và sai số góc hướng tương đối để tinh chỉnh trực tiếp vận tốc dài và vận tốc góc của phương tiện. Hiệu quả của thuật toán đề xuất được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy hệ thống duy trì đội hình ổn định, khả năng bám quỹ đạo chính xác và cải thiện đáng kể tốc độ đáp ứng so với các phương pháp truyền thống.

Từ khóa: AUV, Điều khiển đa tác tử, Logic mờ, Chiến lược Leader-Follower, Giữ đội hình.

1. Giới thiệu

Trong những thập kỷ gần đây, công nghệ ngầm tự hành AUV (Autonomous Underwater Vehicles) đã chứng kiến sự phát triển vượt bậc, trở thành công cụ chủ lực trong việc chinh phục và khai thác tài nguyên đại dương. AUV đóng vai trò thiết yếu trong đa dạng các lĩnh vực, từ khảo sát địa chất, vẽ bản đồ đáy biển cho đến các nhiệm vụ an ninh quốc phòng như rà phá thủy lôi và trinh sát [1], [2]. Tuy nhiên, năng lực của một AUV đơn lẻ thường bị giới hạn về tải trọng thiết bị, phạm vi hoạt động và khả năng hoàn thành các nhiệm vụ phức tạp đòi hỏi sự phối hợp đồng thời [3]. Để khắc phục hạn chế này, các hệ thống đa tác tử đã trở thành xu hướng nghiên cứu trọng điểm, mang lại lợi ích vượt trội về khả năng mở rộng nhiệm vụ và độ tin cậy của hệ thống [4].

Mặc dù vậy, việc điều khiển phối hợp nhóm AUV đối mặt với những thách thức kỹ thuật nghiêm trọng do đặc thù của môi trường thủy ấn. Môi trường nước có tính chất phi tuyến cao với các nhiễu động dòng chảy khó lường thay đổi theo độ sâu, khiến việc xác định chính xác mô hình toán học thủy động lực học là cực kỳ khó khăn [5]. Bên cạnh đó, hạn chế về băng thông truyền thông thủy âm và độ trễ tín hiệu cũng gây trở ngại lớn cho việc trao đổi dữ liệu vị trí liên tục giữa các tác tử [6].

Về chiến lược duy trì đội hình, các nghiên cứu trước đây đã đề xuất nhiều phương pháp tiếp cận như cấu trúc ảo [7] hay dựa trên hành vi [8]. Tuy nhiên, chiến lược Leader-Follower vẫn được ưu tiên lựa chọn trong nhiều ứng dụng thực tế nhờ cấu trúc điều khiển đơn giản và tính minh bạch trong luồng thông tin [9].

Về thuật toán điều khiển, các bộ điều khiển kinh điển như PID thường được sử dụng do tính đơn giản, nhưng chúng bộc lộ nhược điểm lớn khi đối mặt với tính phi tuyến mạnh của AUV, dẫn đến sai số bám lớn khi môi trường thay đổi. Các phương pháp hiện đại hơn như điều khiển trượt (SMC) cho thấy khả năng bền vững tốt, nhưng thường mắc phải hiện tượng dao động tần số cao gây hại cho cơ cấu chấp hành [10]. Trong khi đó, các phương pháp dựa trên Mạng nơ-ron hoặc điều khiển dự báo (MPC) dù hiệu quả nhưng lại đòi hỏi khối lượng tính toán quá lớn, không phù hợp với phần cứng hạn chế của các AUV cỡ nhỏ [11].

Mặc dù tiềm năng ứng dụng là rất lớn, việc điều khiển phối hợp nhóm AUV đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật. Môi trường nước có tính chất phức tạp với các nhiễu động dòng chảy khó lường, đồng thời việc xác định chính xác mô hình toán học thủy động lực học của AUV là rất khó khăn. Bên cạnh đó, môi trường dưới nước cũng đặt ra những rào cản lớn về băng thông và độ trễ trong truyền thông, gây khó khăn cho việc trao đổi dữ liệu liên tục giữa các AUV. Để khắc phục các nhược điểm trên, logic mờ (Fuzzy Logic) được xem là giải pháp tối ưu nhờ khả năng xử lý các thông tin không chắc chắn và mô phỏng tư duy điều khiển linh hoạt của con người mà không yêu cầu mô hình toán học chính xác tuyệt đối. Dựa trên cơ sở đó, bài báo này đề xuất cấu trúc bộ điều khiển Logic Mờ (FLC) độc lập áp dụng cho AUV Follower nhằm tối ưu hóa chất lượng bám đội hình. Những đóng góp mới và cốt lõi của nghiên cứu này bao gồm:

+ Thứ nhất, chuyển đổi độc lập bài toán điều khiển đội hình đa biến (MIMO) phức tạp thành hai kênh ổn định cục bộ thông qua việc khảo sát chi tiết đạo hàm động học sai số hình học. Mối quan hệ giữa sai số cự ly - vận tốc dài và sai số hướng - vận tốc góc được chứng minh tường minh, tạo cơ sở toán học vững chắc cho việc xây dựng cấu trúc FLC.

+ Thứ hai, đề xuất hệ luật mờ 25 quy tắc phi tuyến cải tiến dành cho kênh điều khiển vận tốc, trong đó tích hợp điều kiện ràng buộc an toàn: tự

động tìm hãm vận tốc dài khi AUV đối mặt với góc lệch hướng quá lớn (quay gấp). Cơ chế này giúp phương tiện tránh hiện tượng trượt quỹ đạo ly tâm thường gặp ở các bộ điều khiển kinh điển.

+ Thứ ba, đánh giá toàn diện tính bền vững của thuật toán qua kịch bản chịu tác động bất định của nhiễu dòng chảy thủy động lực học. Kết quả chứng minh bộ điều khiển mờ nâng cao rõ rệt năng lực kháng nhiễu, giúp giảm tới 30% sai lệch khoảng cách cực đại và cải thiện độ ổn định hướng gấp 8 lần so với bộ điều khiển PID truyền thống.

2. Mô hình toán học

2.1. Mô hình động học của AUV

Giả sử AUV hoạt động trong mặt phẳng ngang (3 bậc tự do). Phương trình động học của AUV thứ i (bao gồm Leader - l và Follower - f) được mô tả như phương trình (1).

$$\dot{\eta}_i = R(\psi_i) v_i \quad (1)$$

Trong đó:

$\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$ là vị trí và hướng trong hệ tọa độ Trái Đất.

$v_i = [u_i, v_i, r_i]^T$ là vận tốc trong hệ tọa độ gắn liền thân (Surge, Sway, Yaw).

$R(\psi_i)$ là ma trận quay và được định nghĩa như biểu thức (2)

$$R(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2. Mô hình sai số đội hình

Để thiết kế bộ điều khiển bám đội hình chính xác, yêu cầu tiên quyết là xác định mối quan hệ hình học động học giữa AUV Leader và AUV Follower trong hệ tọa độ trái đất. Bài toán đặt ra là điều khiển AUV Follower duy trì một vị trí tương đối cố định so với Leader, được đặc trưng bởi khoảng cách an toàn d và góc hướng ψ .

Giả sử vị trí tức thời và góc hướng của AUV Leader và AUV Follower trong hệ tọa độ trái đất lần lượt là $\eta_l = [x_l, y_l, \psi_l]^T$ và $\eta_f = [x_f, y_f, \psi_f]^T$. Khoảng cách Euclide thực tế d và góc phương vị β của Follower so với Leader được xác định bởi biểu thức (3).

$$d = \sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2} \quad (3)$$

$$\beta = \text{atan2}(y_l - y_f, x_l - x_f)$$

Sai số đội hình (E) được định nghĩa là sự chênh lệch giữa trạng thái thực tế và trạng thái mong muốn. Gọi d_d là khoảng cách duy trì mong muốn và ψ_d là góc hướng mong muốn (thường được xác định dựa trên góc phương vị mục tiêu để Follower hướng về phía Leader hoặc duy trì đội hình lệch bên). Vector sai số bao gồm sai số khoảng cách (e_d) và sai số góc hướng (e_ψ) được xác định như biểu thức (4):

$$\begin{cases} e_d = d - d_d \\ e_\psi = \beta - \psi_f \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó:

e_d : Đại diện cho sai lệch về vị trí tuyến tính. Nếu $e_d > 0$, Follower đang ở xa hơn khoảng cách quy định; ngược lại, $e_d < 0$ nghĩa là Follower đang xâm phạm vùng an toàn.

e_ψ : Đại diện cho sai lệch về hướng mũi của Follower so với đường ngắm (Line-of-Sight) tới Leader. Mục tiêu của điều khiển hướng là triệt tiêu e_ψ để mũi tàu luôn hướng về vị trí mục tiêu.

Để chứng minh tính khả thi của việc sử dụng vận tốc dài (u_f) và vận tốc góc (r_f) của Follower làm tín hiệu điều khiển nhằm triệt tiêu các sai số trên, ta tiến hành khảo sát động học sai số bằng cách đạo hàm phương trình (4) theo thời gian. Xét đạo hàm sai số khoảng cách theo thời gian $\dot{e}_d$:

$$\dot{e}_d = \dot{d} = \frac{(x_l - x_f)(\dot{x}_l - \dot{x}_f) + (y_l - y_f)(\dot{y}_l - \dot{y}_f)}{\sqrt{(x_l - x_f)^2 + (y_l - y_f)^2}} \quad (5)$$

Thay thế các phương trình động học của AUV (từ mục 2.1) vào biểu thức (5), với:

$$\dot{x}_f = u_f \cos \psi_f - v_f \sin \psi_f, \text{ và:}$$

$$\dot{y}_f = u_f \sin \psi_f + v_f \cos \psi_f;$$

ta có thể viết lại động học sai số khoảng cách dưới dạng phụ thuộc vào vận tốc của

Follower như biểu thức (6).

$$\dot{e}_d = \dot{r}_1(u_l, v_l) - (u_f \cos e_\psi + v_f \sin e_\psi) \quad (6)$$

Từ phương trình trên, ta thấy rằng tốc độ biến thiên của sai số khoảng cách ($\dot{e}_d$) phụ thuộc trực tiếp và chủ yếu vào vận tốc tới u_f của Follower (với giả thiết v_f nhỏ và e_ψ được kiểm soát tốt). Điều này tạo cơ sở lý thuyết vững chắc cho việc xây dựng Bảng Luật mờ 1, trong đó đầu ra điều khiển vận tốc u_f được suy diễn dựa trên đầu vào e_d .

Tương tự, xét đạo hàm sai số góc theo thời gian $\dot{e}_\psi$:

$$\dot{e}_\psi = \dot{\beta} - \dot{\psi}_f = \frac{(x_l - x_f)(\dot{y}_l - \dot{y}_f) - (y_l - y_f)(\dot{x}_l - \dot{x}_f)}{d^2} - r_f \quad (7)$$

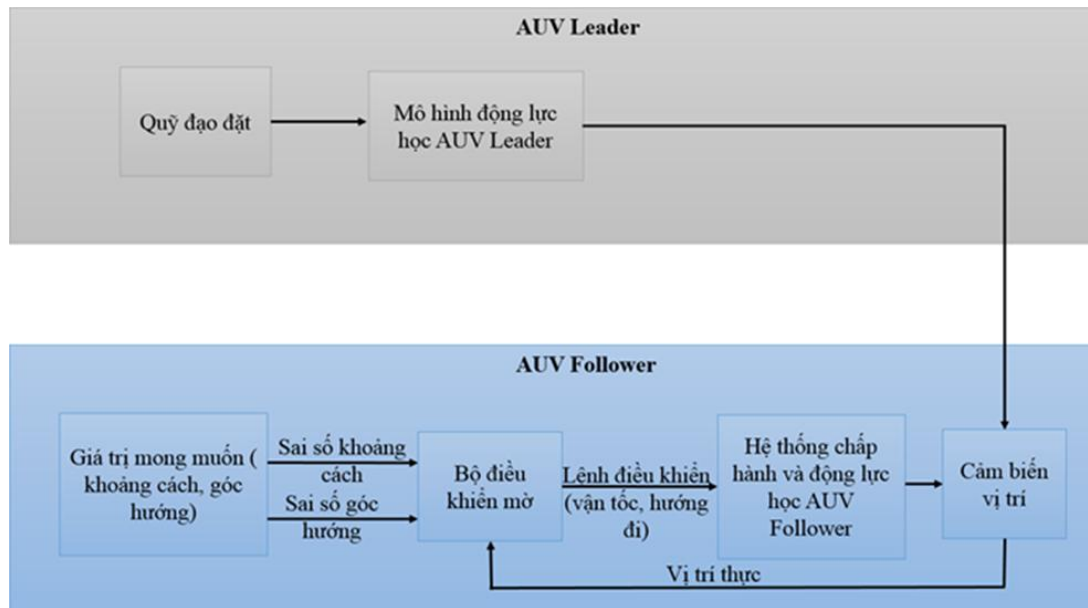
Phương trình (7) chỉ ra rằng tốc độ thay đổi của sai số góc phụ thuộc trực tiếp vào vận tốc góc quay mũi r_f của Follower. Khi r_f thay đổi, hướng ψ_f thay đổi, từ đó tác động trực tiếp lên e_ψ . Mối quan hệ nhân quả này là cơ sở để thiết kế Bảng Luật mờ 2, sử dụng sai số góc e_ψ để điều khiển mô men quay r_f .

Thông qua phân tích toán học trên, bài toán điều khiển đội hình phức tạp đã được phân rã thành hai bài toán điều khiển bám ổn định cục bộ: (1) Điều khiển khoảng cách dùng vận tốc dài và (2) Điều khiển hướng dùng vận tốc góc. Mục tiêu cuối cùng của bộ điều khiển là đảm bảo $\lim_{t \rightarrow \infty} e_d(t) = 0$ và $\lim_{t \rightarrow \infty} e_\psi(t) = 0$.

3. Thiết kế bộ điều khiển Logic mờ

Để giải quyết vấn đề phi tuyến và sự không chắc chắn của các tham số thủy động lực học, nghiên cứu này đề xuất sử dụng bộ điều khiển Logic Mờ (FLC) kiểu Mamdani. Bộ điều khiển được thiết kế để trực tiếp tạo ra các tín hiệu điều khiển động lực học cho AUV Follower dựa trên sai số đội hình.

Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển được mô tả như trong Hình 1, trong đó bộ FLC đóng vai trò trung tâm trong việc chuyển đổi các sai số hình học thành lệnh điều khiển vật lý.



Hình 1. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển AUV Leader – Follower

3.1. Cấu trúc bộ điều khiển

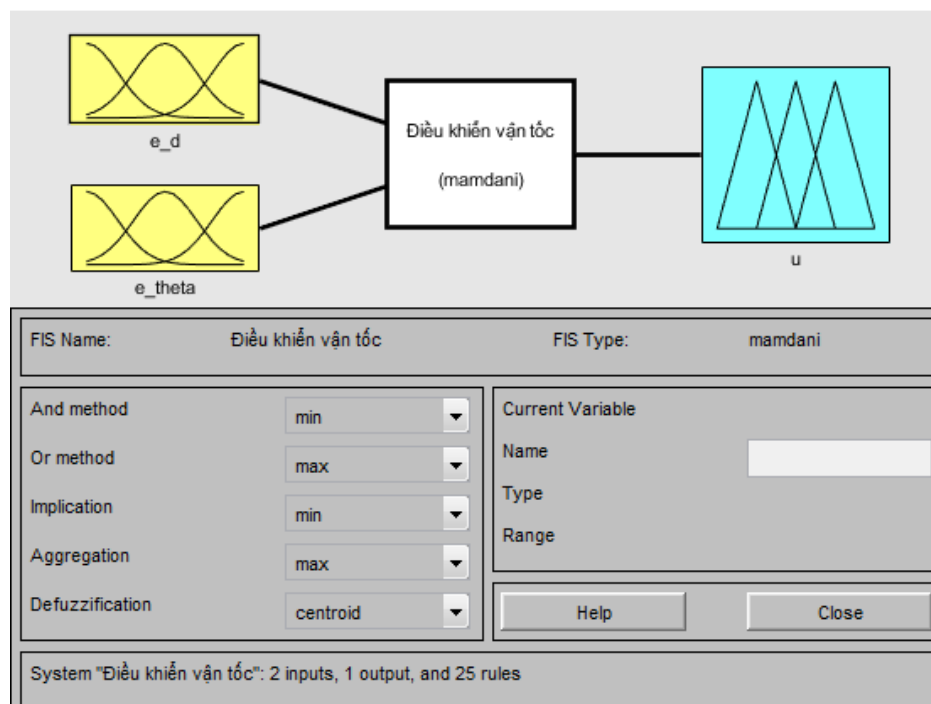
Bộ điều khiển Mờ được xây dựng với cấu trúc hai đầu vào và hai đầu ra (MIMO), cụ thể như sau:

Đầu vào (Inputs): Gồm sai số khoảng cách (e_d) và sai số góc lệch hướng (e_ψ) giữa Follower và Leader, được tính toán từ mô hình sai số đội hình.

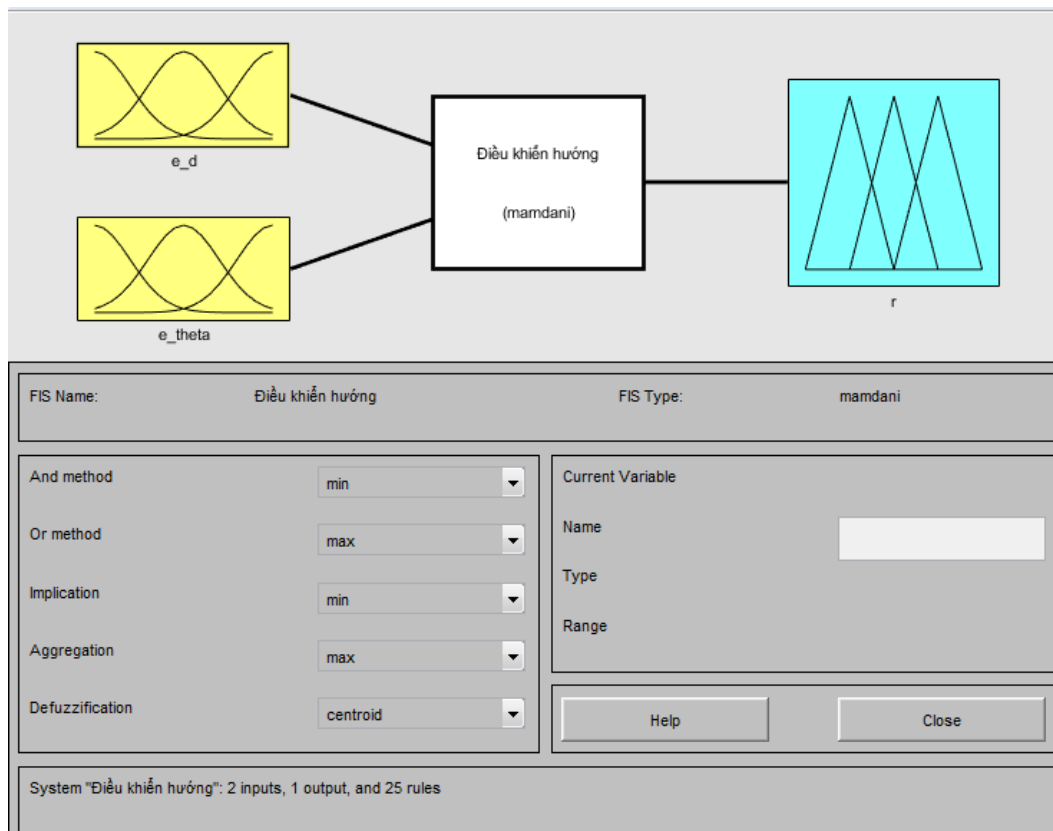
Đầu ra (Outputs): Gồm tín hiệu điều chỉnh

vận tốc tới (u_f) và tốc độ quay mũi (r_f) cho AUV Follower.

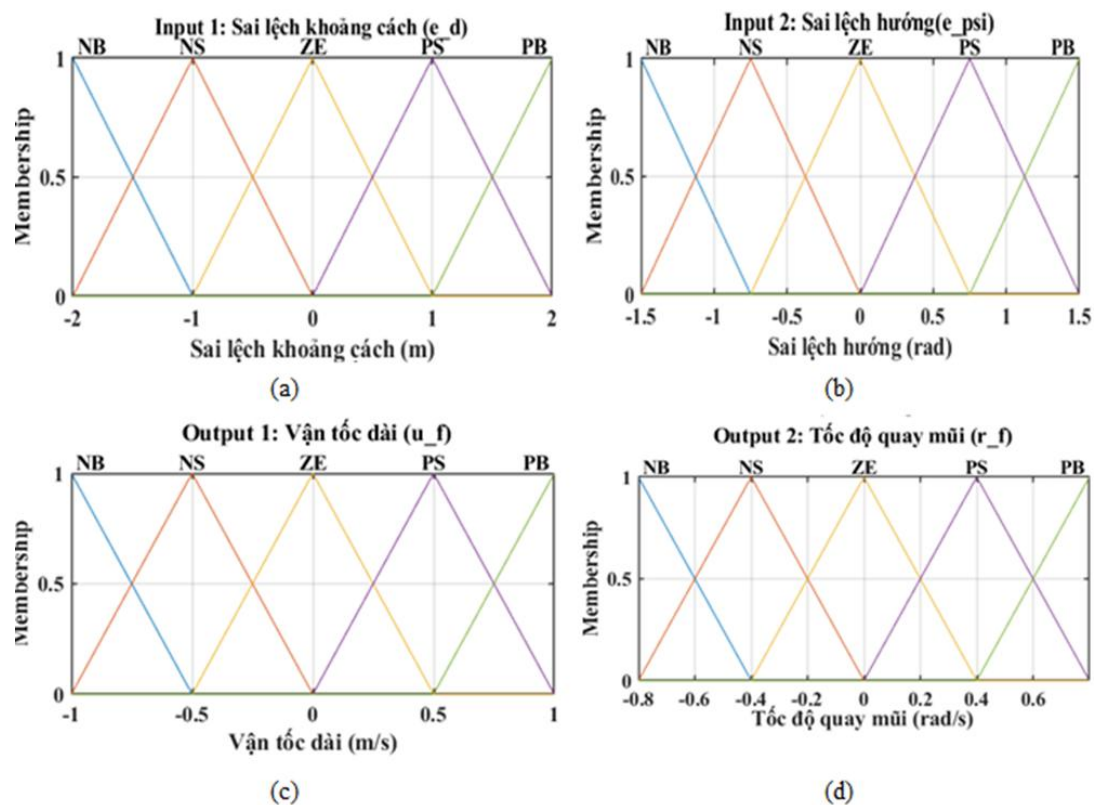
Hệ thống điều khiển được thiết kế gồm hai bộ điều khiển mờ hoạt động độc lập để đơn giản hóa quá trình tính toán: một bộ điều khiển chịu trách nhiệm về vận tốc tới (u_f) và một bộ chịu trách nhiệm về tốc độ quay mũi (r_f). Cấu trúc thiết kế cụ thể trên công cụ Fuzzy Logic Toolbox được thể hiện như trong hình 2.



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển mờ: (a) bộ điều khiển cho vận tốc tới (u_f)



Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển mờ: (b) bộ điều khiển tốc độ quay mũi (r_f)



Hình 3. Hàm trực thuộc của các biến vào/ra: (a) đầu vào sai lệch khoảng cách; (b) đầu vào sai lệch hướng; (c) đầu ra vận tốc dài; (d) đầu ra tốc độ quay mũi

3.2. Mờ hóa

Quá trình mờ hóa chuyển đổi các giá trị đầu vào rõ thành các biến ngôn ngữ mờ. Các biến đầu vào (e_d, e_ψ) và đầu ra (u_f, r_f) được chuẩn hóa và phân chia thành 5 tập mờ với hàm trực thuộc dạng tam giác để đảm bảo tính đơn giản và tốc độ tính toán thực thi.

Không gian của các biến ngôn ngữ đầu vào và đầu ra được chuẩn hóa và phân chia thành 5 tập mờ, với các định nghĩa tương ứng với trạng thái vật lý của AUV như sau:

NB (Negative Big - Âm lớn) đại diện cho sai số âm rất lớn, tương ứng với trạng thái ở quá gần mục tiêu hoặc bị lệch trái nhiều;

NS (Negative Small - Âm nhỏ) biểu thị sai số âm nhỏ, tức AUV đang ở hơi gần hoặc hơi lệch trái;

ZE (Zero - Không) là trạng thái lý tưởng khi sai số hội tụ về 0, nghĩa là AUV đã đạt khoảng cách chuẩn hoặc đang đi đúng hướng;

PS (Positive Small - Dương nhỏ) tương ứng với sai số dương nhỏ khi AUV bị tụt lại hơi xa hoặc hơi lệch phải;

PB (Positive Big - Dương lớn) phản ánh sai

số dương lớn, chỉ tình trạng AUV bị bỏ lại quá xa hoặc lệch phải nhiều so với quỹ đạo tham chiếu.

Hàm trực thuộc của các biến đầu vào và đầu ra được mô tả như hình 3 ở trên.

3.3. Cơ sở luật mờ

Hệ thống sử dụng quy tắc suy diễn "If-Then" của Mamdani với tổng cộng 25 luật (5x5) cho mỗi biến đầu ra. Việc thiết kế bảng luật dựa trên kinh nghiệm. Ví dụ về luật điều khiển: IF e_d is PB AND e_ψ is ZE THEN u_f is PB, r_f is ZE.

* Luật điều khiển vận tốc

Đối với điều khiển vận tốc, mục tiêu cốt lõi là điều tiết vận tốc dài dựa trên sai số khoảng cách (e_d). Tuy nhiên, chiến lược điều khiển còn tích hợp yếu tố sai số góc (e_ψ) để đảm bảo tính ổn định. Cụ thể, trong trường hợp góc lệch lớn (khi AUV cần thực hiện quay gấp), hệ thống sẽ kìm hãm sự gia tăng vận tốc ngay cả khi khoảng cách đến mục tiêu còn xa. Cơ chế này giúp ngăn ngừa hiện tượng trượt và đảm bảo an toàn cho phương tiện. Chi tiết về 25 luật suy diễn mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa các sai số đầu vào và vận tốc đầu ra được thể hiện tại Bảng 1.

Bảng 1. Bảng luật mờ cho vận tốc dài

$e_d \backslash e_\psi$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NS	NS	NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS	PS	PS	PS
PB	ZE	PS	PB	PS	ZE

Bảng 2. Bảng luật mờ cho tốc độ quay mũi

$e_d \backslash e_\psi$	PB	PS	ZE	NS	NB
NB	PB	PS	ZE	NS	NB
NS	PB	PS	ZE	NS	NB
ZE	PB	PB	ZE	NB	NB
PS	PB	PB	ZE	NB	NB
PB	PB	PS	ZE	NS	NB

* Luật điều khiển hướng

Song song với điều khiển vận tốc, việc duy trì hướng là yếu tố then chốt để giữ vững đội hình. Bộ điều khiển tốc độ quay mũi (r_f) được thiết kế để khử sai số góc (e_ψ) nhanh chóng mà không gây dao động. Nguyên lý hoạt động dựa trên biên độ sai số: sai số lớn (NB/PB) sẽ kích hoạt tín hiệu quay mạnh, trong khi sai số nhỏ sẽ giảm tốc độ quay để ổn định hướng. Chi tiết các tập luật suy diễn được liệt kê trong Bảng 2.

3.4. Cơ chế suy diễn và giải mờ

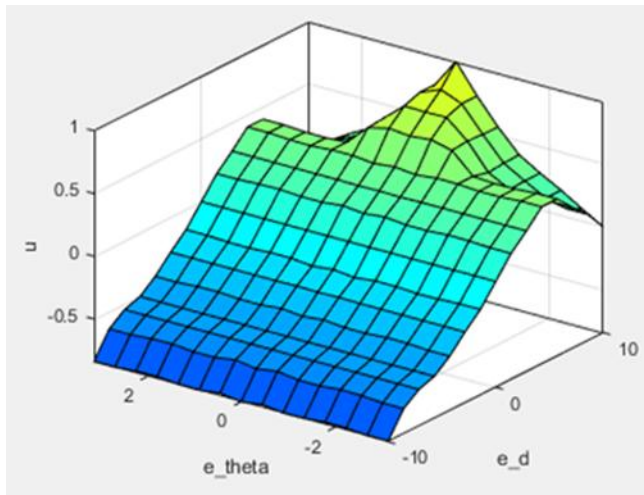
Tại mỗi thời điểm t , với giá trị đầu vào $e_d(t)$ và $e_\psi(t)$, mức độ kích hoạt của luật thứ k được tính

toán bằng phép toán MIN. Giá trị đầu ra rõ y^* (tương ứng là u_f hoặc r_f) được xác định bằng phương pháp giải mờ trọng tâm. Công thức giải mờ được biểu diễn như (8).

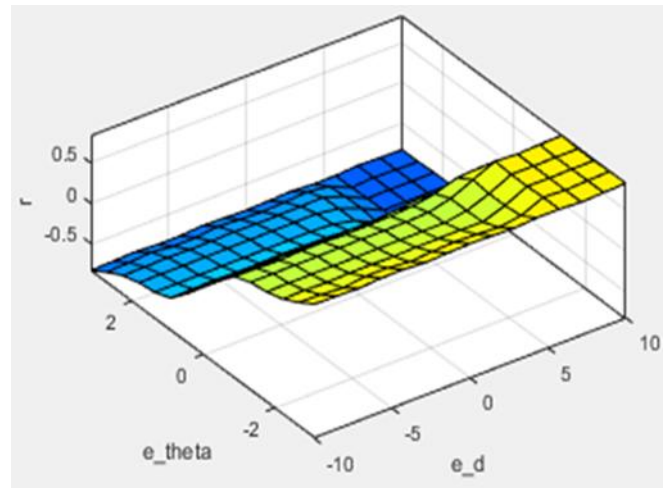
$$y^* = \frac{\int_Y \mu_C(y) \cdot y dy}{\int_Y \mu_C(y) dy} \quad (8)$$

Trong đó, $\mu_C(y)$ là hàm trực thuộc của tập mờ đầu ra tổng hợp và Y là miền giá trị đầu ra.

Để minh họa trực quan quy luật hoạt động của bộ điều khiển, các bề mặt điều khiển không gian biểu diễn mối quan hệ phi tuyến giữa các biến đầu vào (sai số khoảng cách e_d , sai số góc e_ψ) và tín hiệu đầu ra được trình bày như hình 4.



(a)



(b)

Hình 4. Bề mặt điều khiển mờ:

(a) Tín hiệu điều khiển vận tốc dài; (b) Tín hiệu điều khiển tốc độ góc

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Cài đặt và thông số mô phỏng

Cấu hình đội hình Leader-Follower được thiết lập với mục tiêu duy trì vị trí tương đối cố định.

AUV Follower được yêu cầu di chuyển ở phía bên phải của Leader. Các thông số hình học và giới hạn vật lý của AUV được tóm tắt và đưa vào Bảng 3.

Bảng 3. Thông số cài đặt mô phỏng chung

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Thời gian mô phỏng	Tsim	200	s
Bước thời gian	Δt	0.1	s
Khoảng cách đội hình mong muốn	d_d	5.0	m
Phía đội hình	Side	-1 (Phải)	-
Vận tốc tối đa của AUV	u_{max}	5.0	m/s
Tốc độ quay tối đa	r_{max}	1.2	rad/s

Bộ điều khiển PID được tinh chỉnh các hệ số K_p, K_i, K_d để đạt hiệu suất tốt nhất có thể cho bài toán bám quỹ đạo này, đóng vai trò là cơ sở đối

chứng với bộ điều khiển mờ được đề xuất. Các tham số của bộ điều khiển PID được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Tham số bộ điều khiển PID

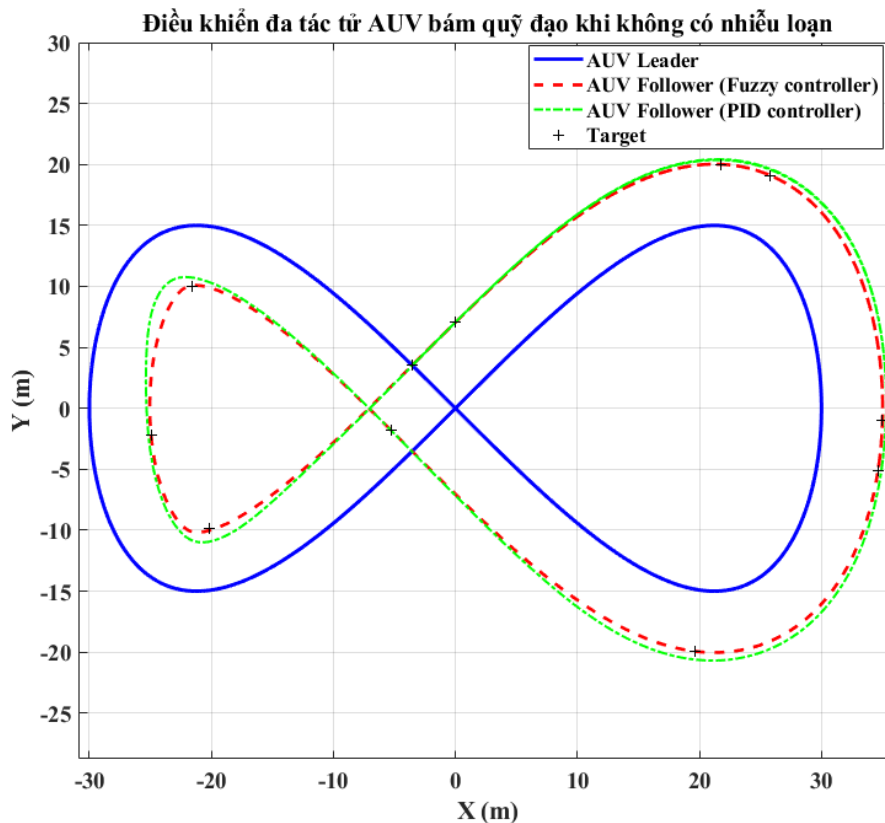
Tham số	K_p	K_i	K_d
Khoảng cách (u)	1.5	0.02	0.1
Góc hướng (r)	1.0	0.01	0.2

4.2. Kết quả mô phỏng

(i) **Kịch bản 1:** Mô phỏng đa tác tử AUV bám quỹ đạo khi không có nhiễu tác động

Kết quả Hình 5 cho thấy cả hai bộ điều khiển đều giúp AUV Follower duy trì đội hình, nhưng bộ điều khiển Fuzzy (đường nét đứt màu đỏ) thể hiện độ chính xác vượt trội so với bộ điều khiển PID (đường nét chấm gạch xanh). Quan sát tại các

điểm uốn có độ cong lớn (như tại khu vực có tọa độ $X \approx \pm 22m$), đường đi của AUV với bộ điều khiển Fuzzy bám rất sát các điểm mục tiêu (dấu cộng), trong khi PID có xu hướng bị văng ra xa khỏi quỹ đạo mong muốn. Điều này chứng minh thuật toán Fuzzy đề xuất giúp AUV xử lý các thay đổi hướng di chuyển đột ngột mượt mà và chính xác hơn hẳn so với giải pháp PID truyền thống.



Hình 5. Điều khiển đa tác tử AUV bám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi không có nhiễu loạn

Về độ ổn định hướng di chuyển, đồ thị Hình 6 phản ánh sự chênh lệch hiệu suất giữa bộ điều khiển PID kinh điển và bộ điều khiển mờ đề xuất, trong đó bộ điều khiển PID (đường nét đứt màu

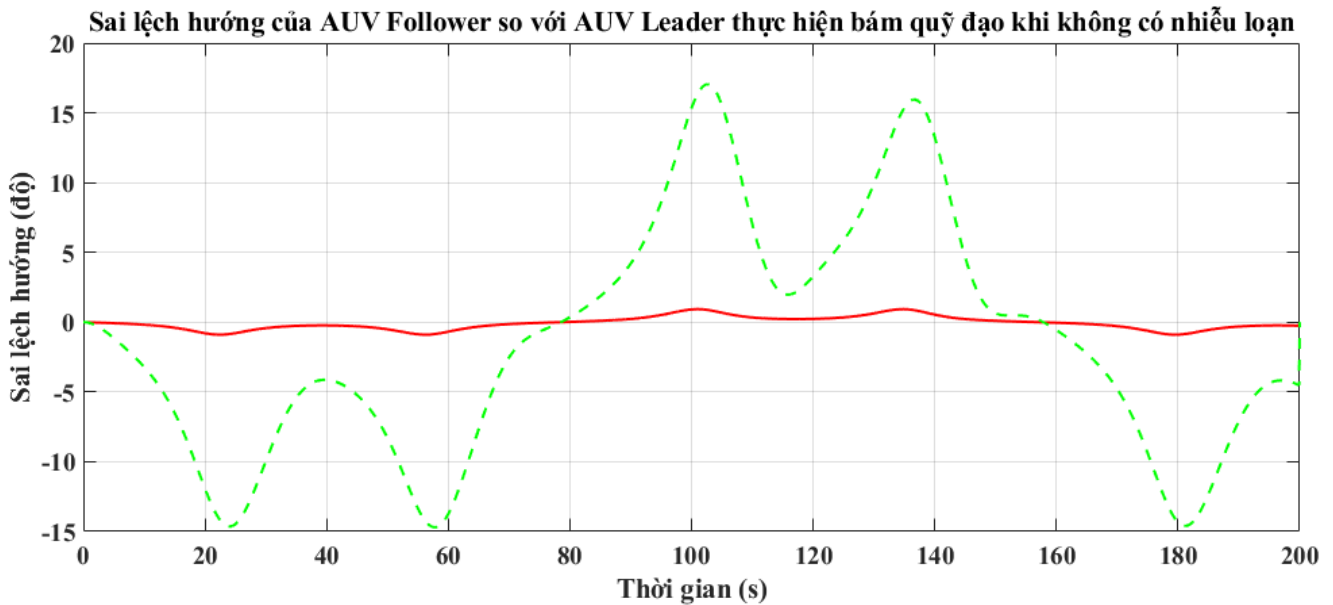
xanh) xuất hiện dao động điều hòa với biên độ rất lớn, trải rộng từ cực tiểu -15 độ đến cực đại 17 độ. Sự dao động mạnh và liên tục này cho thấy bộ tham số PID cố định phản ứng kém với sự thay đổi

trạng thái của hệ thống, gây ra sự rung lắc không cần thiết cho phương tiện.

Với bộ điều khiển Fuzzy (đường liền nét màu đỏ) duy trì sai số hướng gần như triệt tiêu trong suốt quá trình mô phỏng, đảm bảo sự ổn định cao

với biên độ dao động cực nhỏ chỉ nằm trong phạm vi hẹp ± 1 độ.

Kết quả định lượng này khẳng định bộ điều khiển đề xuất có khả năng giữ hướng ổn định tốt hơn so với bộ điều khiển PID kinh điển.

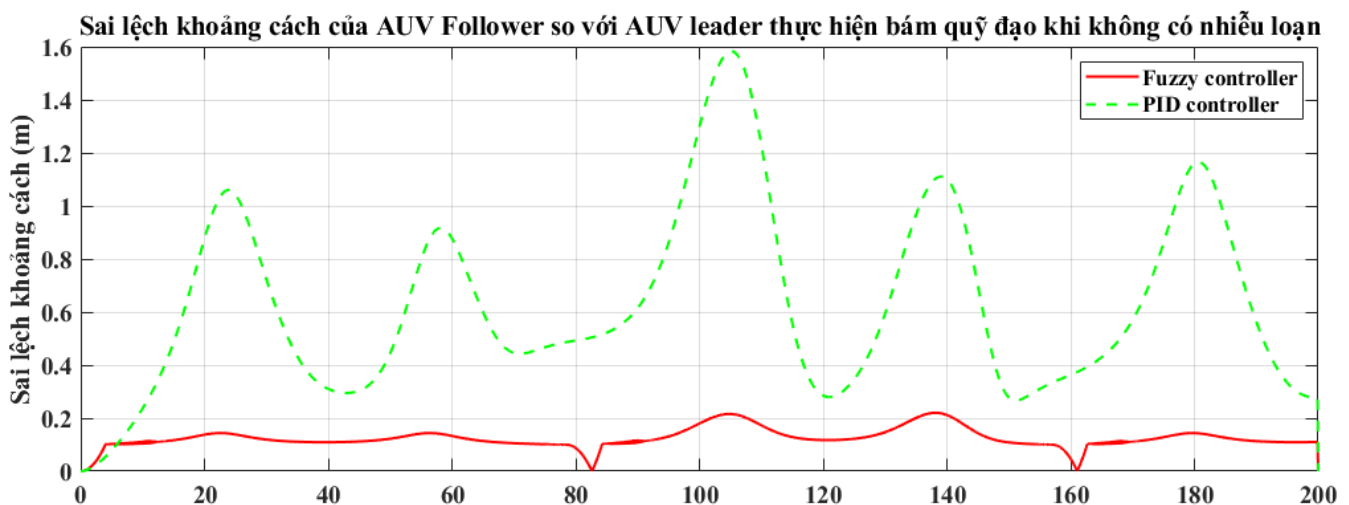


Hình 6. Sai lệch hướng của AUV Follower thực hiện bám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi không có nhiễu loạn

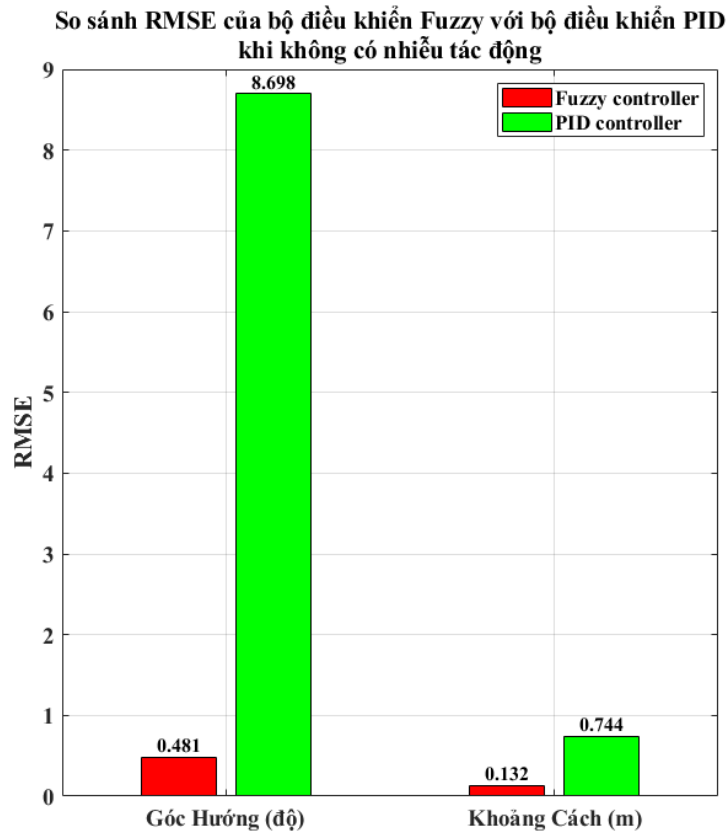
Sai lệch khoảng cách được biểu diễn chi tiết ở Hình 7.

Bộ điều khiển Fuzzy đề xuất tiếp tục khẳng định ưu thế vượt trội với sai lệch khoảng cách rất nhỏ, duy trì sai số ổn định quanh mức 0.1 m và chỉ

đạt giá trị cực đại khoảng 0.2 m. Trong khi đó, đáp ứng của bộ điều khiển PID thể hiện sự thiếu chính xác với các dao động biên độ lớn, thường xuyên vượt ngưỡng 1.0 m và đạt đỉnh sai số lên tới 1.6 m tại thời điểm $t = 105$ giây.



Hình 7. Sai lệch khoảng cách của AUV Follower thực hiện bám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi không có nhiễu loạn



Hình 8. So sánh RMSE về sai lệch góc hướng và khoảng cách của AUV giữa bộ điều khiển Fuzzy và bộ điều khiển PID trong trường hợp không có nhiễu tác động.

So sánh về mặt định lượng, sai số cực đại của bộ điều khiển PID lớn gấp khoảng 8 lần so với bộ điều khiển Fuzzy, đồng thời biên độ dao động cũng không có dấu hiệu suy giảm nhanh. Qua đó, bộ điều khiển Fuzzy chứng minh được độ tin cậy cao và khả năng giữ cự ly đội hình chặt chẽ cho các AUV.

Dựa vào biểu đồ Hình 8, bộ điều khiển Fuzzy cho kết quả vượt trội so với bộ điều khiển PID khi không có nhiễu tác động, thể hiện qua giá trị RMSE thấp hơn rất nhiều ở cả hai tiêu chí đánh giá. Cụ thể, sai số RMSE của Fuzzy giảm mạnh so với PID, từ 8.698 xuống còn 0.481 đối với góc hướng (độ) và từ 0.744 xuống chỉ còn 0.132 đối với khoảng cách (m).

(ii) Kịch bản 2: Mô phỏng đa tác tử AUV bám quỹ đạo khi có nhiễu dòng chảy.

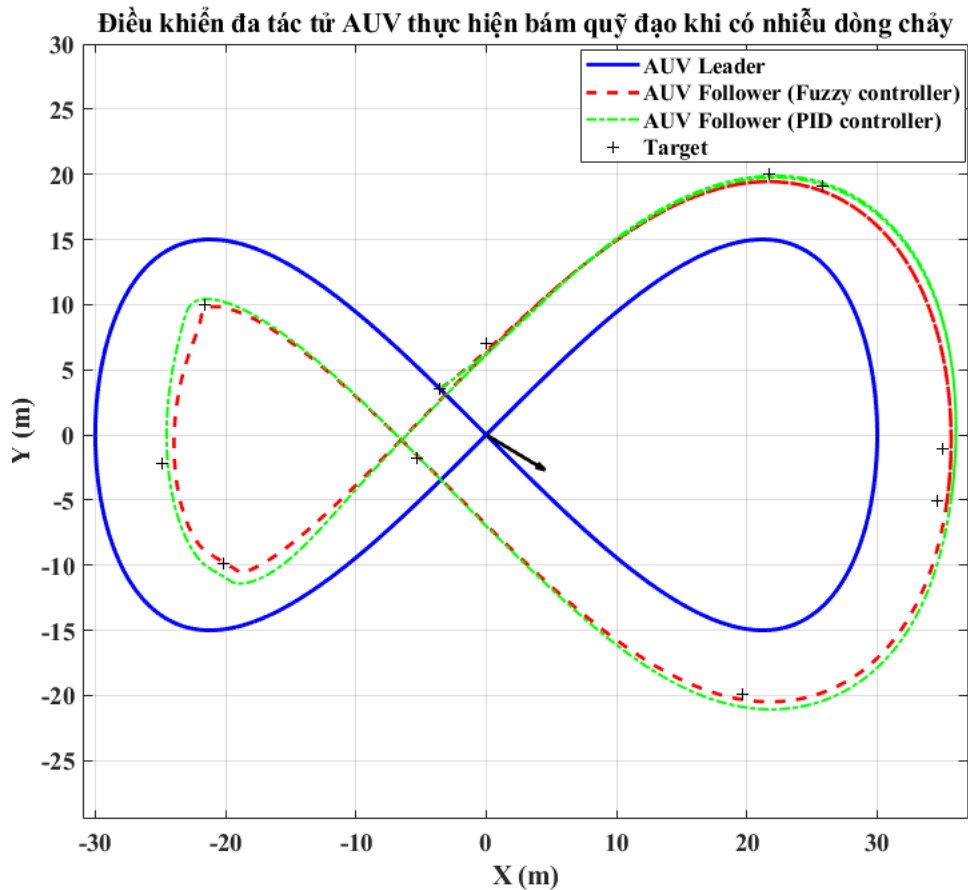
Kết quả mô phỏng tại Hình 9 cho thấy tác động rõ rệt của nhiễu dòng chảy lên khả năng bám quỹ đạo của đội hình, trong đó bộ điều khiển PID

(nét chấm gạch xanh) bị ảnh hưởng nghiêm trọng. Do không có cơ chế bù nhiễu, quỹ đạo của AUV dùng PID bị dòng chảy đẩy trôi dạt ra xa khỏi các điểm mục tiêu (dấu cộng), đặc biệt tại các khúc cua, tạo ra khoảng cách sai lệch lớn có thể quan sát trực quan.

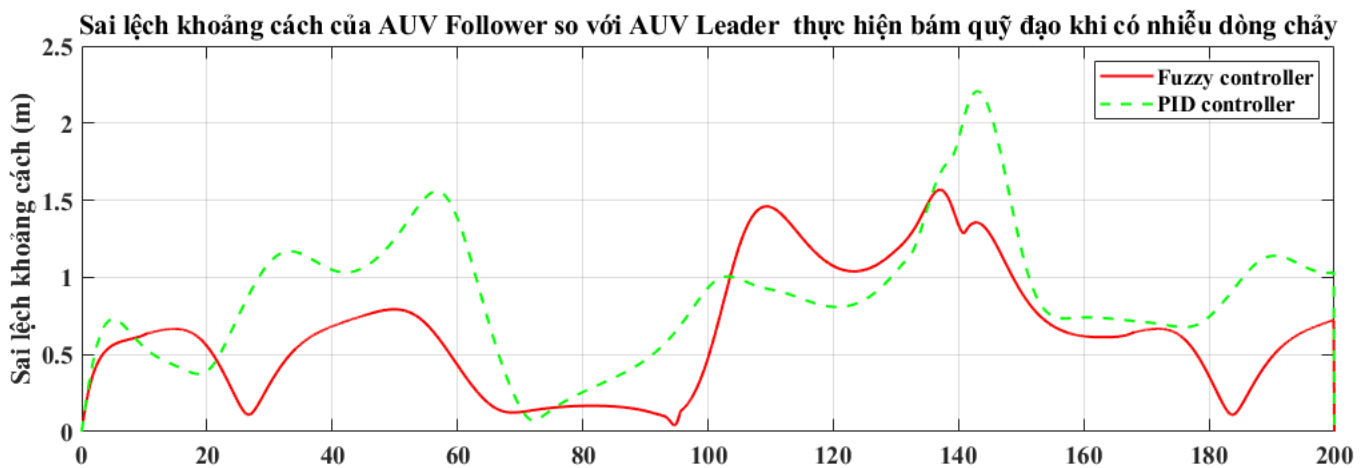
Ngược lại, bộ điều khiển Fuzzy (nét đứt đỏ) thể hiện tính bền vững cao khi quỹ đạo thực tế vẫn bám rất sát đường tham chiếu của Leader, ngay cả khi đối diện với dòng chảy mạnh.

Điều này chứng minh khả năng kháng nhiễu động học của thuật toán Fuzzy ưu việt hơn hẳn, giúp phương tiện duy trì đội hình chính xác hơn so với giải pháp kinh điển.

Tại Hình 10, sai lệch khoảng cách của bộ điều khiển PID khá lớn, giá trị lên tới 2.2 m tại thời điểm 140 giây. Trong cùng điều kiện nhiễu, bộ điều khiển Fuzzy kiểm soát tốt hơn, sai số lớn nhất ở mức 1.5 m, giúp giảm thiểu khoảng 30% sai lệch so với bộ điều khiển PID.



Hình 9. Điều khiển đa tác tử AUV tám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi có nhiễu dòng chảy

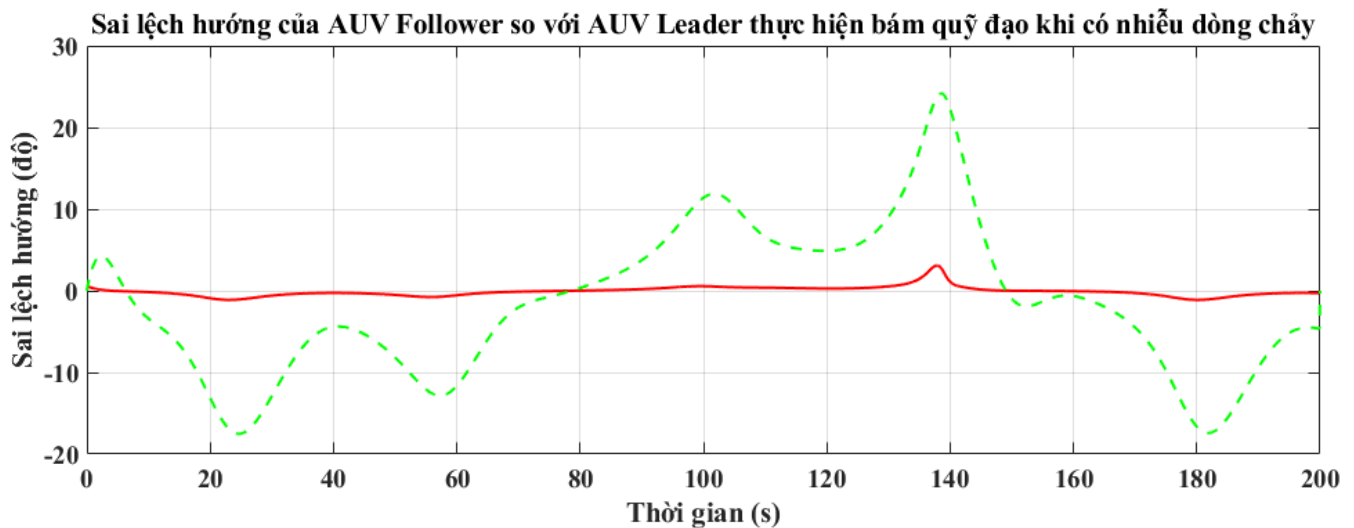


Hình 10. Sai lệch khoảng cách của AUV Follower thực hiện tám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi có nhiễu dòng chảy

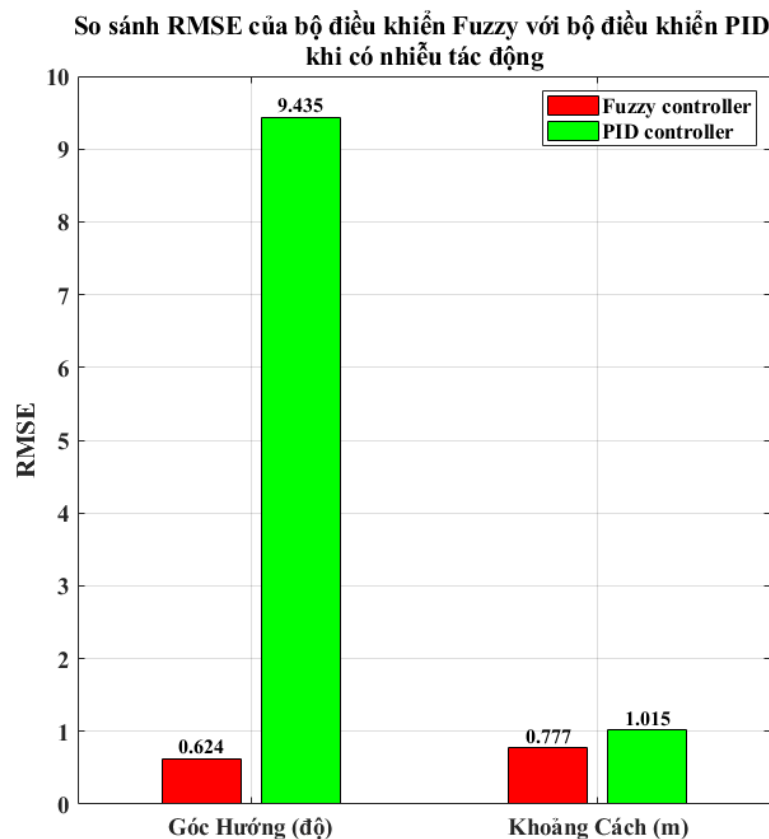
Đồ thị Hình 11 phản ánh sai lệch hướng, sai số của bộ PID dao động lớn trong khoảng rộng từ -18 độ đến 24 độ.

Trái lại, bộ điều khiển Fuzzy thể hiện độ ổn định tương đối tốt, giữ sai lệch hướng chỉ biến thiên nhẹ trong phạm vi hẹp từ 0 đến 3 độ (thấp hơn khoảng 8 lần so với PID).

Hình 12 cho thấy khi có nhiễu tác động, bộ điều khiển Fuzzy tiếp tục chứng minh khả năng chống nhiễu vượt trội và ổn định hơn bộ điều khiển PID nhờ duy trì mức sai số RMSE rất thấp. Cụ thể, sai số RMSE của Fuzzy chỉ là 0.624 ở góc hướng (so với 9.435 của PID) và 0.777 ở khoảng cách (so với 1.015 của PID).



Hình 11. Sai lệch hướng của AUV Follower thực hiện bám quỹ đạo với bộ điều khiển mờ khi có nhiễu dòng chảy



Hình 12. So sánh RMSE về sai lệch góc hướng và khoảng cách của AUV giữa bộ điều khiển Fuzzy và bộ điều khiển PID trong trường hợp có nhiễu tác động.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp thiết kế và kiểm chứng bộ điều khiển Logic mờ cho bài toán điều khiển đội hình AUV theo cấu trúc Leader-Follower. Nghiên cứu tập trung giải quyết các thách

thức về tính phi tuyến của mô hình động lực học và sự tác động bất định của nhiễu môi trường nước. Các kết quả mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simulink đã minh chứng tính hiệu quả của thuật toán đề xuất qua hai kịch bản vận hành.

Với kích bản không có nhiễu loạn, bộ điều khiển Logic mờ duy trì đội hình với độ chính xác cao, giữ sai lệch khoảng cách ổn định ở mức thấp (khoảng 0.1 m) và triệt tiêu hầu hết các dao động hướng ($\pm 1^\circ$), giảm được độ quá điều chỉnh và dao động mạnh thường thấy ở bộ điều khiển PID. Với kích bản có nhiễu loạn do dòng chảy, giải pháp đề xuất thể hiện khả năng kháng nhiễu vượt trội. So với bộ điều khiển PID, thuật toán Logic mờ giúp giảm thiểu sai lệch khoảng cách cực đại khoảng 30% và cải thiện độ ổn định hướng gấp 8 lần, đảm bảo AUV Follower bám sát quỹ đạo mục tiêu ngay cả tại các khúc cua gấp.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tiềm năng ứng dụng của Logic mờ trong việc nâng cao chất lượng điều khiển và độ tin cậy cho các hệ thống đa tác tử AUV hoạt động trong môi trường thực tế phức tạp.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, tác giả đã không sử dụng công cụ AI để tạo ra nội dung cho bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Wibisono, M.J. Piran, H.-K. Song, B.M. Lee. (2023). A Survey on Unmanned Underwater VEHICLES: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7321. <https://doi.org/10.3390/s23177321>
- [2] E. Politi, G. Dimitrakopoulos. (2019). Comparison of Evolutionary Algorithms for AUVs for Path Planning in Variable Conditions. *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. <https://doi.org/10.1109/CSCI49370.2019.00231>
- [3] S.N. Alkhamees, S.A. Alsaif, Y.B. Salamah. (2025). Recent Advances and a Hybrid Framework for Cooperative UAV Formation Control. *Applied Sciences*, 15(17), 9761. <https://doi.org/10.3390/app15179761>
- [4] G. Shao, L. Wan, H. Xu. (2024). Formation Control of Autonomous Underwater Vehicles Using an Improved Nonlinear Backstepping Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 878. <https://doi.org/10.3390/jmse12060878>
- [5] T.I. Fossen. (2011). Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- [6] R. Khan, G. Qiao (2013). A Survey of Underwater Acoustic Communication and Networking Techniques. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(3), 778-789. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5022>
- [7] M.A. Lewis, K.H. Tan. (1997). High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 4, 387-403. <https://doi.org/10.1023/A:1008814708459>
- [8] T. Balch, R.C. Arkin. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(6), 926-939. <https://doi.org/10.1109/70.736776>
- [9] T. Yan, Z. Xu, S.X. Yang. (2022). Consensus Formation Tracking for Multiple AUV Systems Using Distributed Bioinspired Sliding Mode Control. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(2), 1081–1092. <https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3175647>
- [10] Z. Ding, H. Wang, Y. Sun, H. Qin. (2022). Adaptive Prescribed Performance Second-Order Sliding Mode Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicle Using Neural Network-Based Disturbance Observer. *Ocean Engineering*, 260, 111939. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111939>
- [11] L. Wang, X. Xu, B. Han, H. Zhang. (2023). Multiple Autonomous Underwater Vehicle Formation Obstacle Avoidance Control Using Event-Triggered Model Predictive Control, *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 2016. <https://doi.org/10.3390/jmse11102016>