



Thiết kế bộ điều khiển thích nghi GA-PID cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành thực hiện điều khiển giữ hướng
Design of a GA-PID adaptive controller for underactuated AUVs performing heading control

Đỗ Khắc Tiệp^{1*}, Nguyễn Văn Tiến¹, Tống Lâm Tùng¹

¹Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Từ khóa:

AUV
Bộ điều khiển PID
Điều khiển hướng
Điều khiển phi tuyến
Thuật giải di truyền

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất thiết kế bộ điều khiển thích nghi GA-PID cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành, nhằm mục tiêu điều khiển giữ hướng. Do hạn chế về cơ cấu chấp hành, AUV phải dựa vào việc phân bố lại lực đẩy hoặc moment từ các cơ cấu hiện có để thay đổi hướng di chuyển. Nghiên cứu này tập trung giải quyết các thách thức điều khiển AUV trong môi trường biển phức tạp. Bộ điều khiển GA-PID kết hợp ưu điểm của PID truyền thống với khả năng tối ưu hóa của thuật toán di truyền (GA). GA được sử dụng để tự động điều chỉnh các tham số tối ưu (K_p , K_i , K_d) của bộ điều khiển PID, giúp AUV thích nghi với môi trường và thay đổi trong quá trình vận hành. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển GA-PID cải thiện đáng kể khả năng giữ hướng của AUV so với PID truyền thống, đặc biệt trong môi trường biển phức tạp. Phương pháp này mở ra tiềm năng ứng dụng trong phát triển hệ thống điều khiển tự động cho AUV thực hiện các nhiệm vụ phức tạp dưới nước.

Keywords:

AUV
GA algorithm
Heading control
Nonlinear Control
PID controller

ABSTRACT

This paper proposes the design of a GA-PID adaptive controller for underactuated Autonomous Underwater Vehicles (AUVs), aimed at heading control. Due to limitations in actuators, the AUV must rely on redistributing thrust or moment from existing actuators to change its heading. This research focuses on addressing the challenges of controlling AUVs in complex marine environments. The GA-PID controller combines the advantages of traditional PID controllers with the optimization capabilities of Genetic Algorithms (GA). GA is used to automatically adjust the optimal parameters (K_p , K_i , K_d) of the PID controller, enabling the AUV to adapt to environmental and operational changes. Simulation results demonstrate that the GA-PID controller significantly improves the heading-keeping ability of the AUV compared to traditional PID controllers, especially in complex marine environments. This method opens up potential applications in the development of automatic control systems for AUVs performing complex underwater tasks.

* Đỗ Khắc Tiệp. Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Email: dotiep84@gmail.com

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(3\).102-111](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(3).102-111)

Ngày nhận bài: 19/03/2025; Ngày nhận bài sửa: 15/04/2025; Ngày chấp nhận đăng: 24/04/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/05/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Phương tiện tự hành dưới nước (Autonomous Underwater Vehicles - AUVs) ngày càng đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực, từ nghiên cứu khoa học biển đến các ứng dụng quân sự [1]. Khả năng điều khiển chính xác AUV, đặc biệt là điều khiển giữ hướng (heading control), là yếu tố then chốt để thực hiện các nhiệm vụ phức tạp trong môi trường biển đầy thách thức [2], [3]. Phần lớn các AUV truyền thống dựa vào các cơ cấu chấp hành như bánh lái hoặc vây điều khiển để thay đổi hướng [4]. Tuy nhiên, trong một số thiết kế, việc loại bỏ các cơ cấu này mang lại lợi ích về giảm trọng lượng, chi phí và tăng độ tin cậy. Các AUV thiếu cơ cấu chấp hành (underactuated AUVs) điều khiển hướng bằng cách tạo ra sự chênh lệch lực đẩy giữa các động cơ [5].

Việc điều khiển AUV thiếu cơ cấu chấp hành đặt ra những thách thức đáng kể. Mô hình động học và động lực học của AUV vốn phi tuyến và có sự ghép nối mạnh [6], nay càng phức tạp hơn do thiếu cơ cấu chấp hành trực tiếp [7]. Môi trường biển biến động với dòng chảy, sóng và nhiễu loạn cũng làm tăng độ khó cho bài toán điều khiển [6]. Trong số các phương pháp điều khiển cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển PID [8] được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và lý thuyết nền tảng vững chắc. Tuy nhiên, nhược điểm cố hữu của PID là việc tinh chỉnh thủ công các tham số K_p, K_i, K_d để đạt được hiệu suất mong muốn trở nên rất khó khăn và tốn thời gian, đặc biệt là với các hệ thống phức tạp như AUV. Mô hình động học và động lực học của AUV vốn phi tuyến và chịu ảnh hưởng lớn từ môi trường biển nhiễu loạn (dòng chảy, sóng), khiến bộ điều khiển PID với tham số cố định khó duy trì hiệu suất tối ưu trong mọi điều kiện hoạt động [9]. Các giải thuật thông minh như logic mờ [10] và mạng nơ-ron [11] mang lại lợi thế trong việc xử lý

tính phi tuyến và bất định mà không cần mô hình toán học quá chính xác [12]. Mặc dù vậy, các phương pháp này lại đối mặt với thách thức về việc đòi hỏi lượng lớn dữ liệu thực nghiệm hoặc tri thức chuyên gia để thiết kế, huấn luyện bộ điều khiển, đồng thời việc phân tích và đảm bảo tính ổn định cũng phức tạp hơn đáng kể so với PID. Chính vì những ưu và nhược điểm riêng của từng phương pháp, việc tìm kiếm một giải pháp cân bằng, kết hợp được khả năng thích ứng, tối ưu hiệu suất với cấu trúc đủ tin cậy cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành vẫn là hướng nghiên cứu cần thiết.

Gần đây, các phương pháp điều khiển thích nghi và tối ưu hóa đã thu hút sự chú ý trong lĩnh vực điều khiển AUV. Giải thuật Di truyền (Genetic Algorithm - GA) là một kỹ thuật tối ưu hóa mạnh mẽ, đã được ứng dụng thành công để tinh chỉnh các tham số của bộ điều khiển PID trong nhiều hệ thống khác nhau [13], [14], [15]. Một số nghiên cứu đã kết hợp GA với PID để điều khiển AUV [16], [17], nhưng phần lớn tập trung vào AUV có đầy đủ cơ cấu chấp hành và liệu chúng có phù hợp với AUV thiếu cơ cấu chấp hành hay không? Việc chỉ rõ những hạn chế này là rất quan trọng để khẳng định khoảng trống nghiên cứu và sự cần thiết của phương pháp GA-PID thích nghi được đề xuất trong bài báo này.

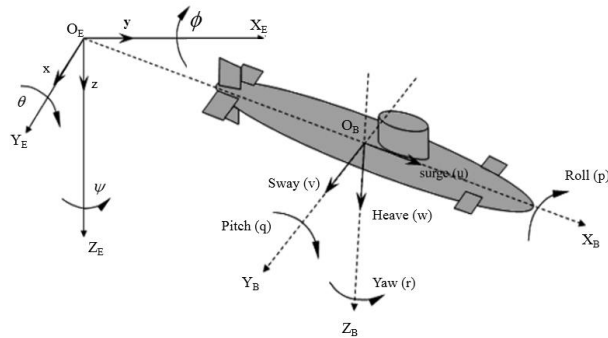
Đóng góp chính và cũng là điểm mới nổi bật của bài báo này là việc đề xuất và thiết kế bộ điều khiển GA-PID có khả năng thích nghi cho bài toán điều khiển giữ hướng của AUV thiếu cơ cấu chấp hành. Thông qua việc ứng dụng thuật toán di truyền (GA) để liên tục tối ưu hóa các tham số K_p, K_i, K_d trong quá trình hoạt động, bộ điều khiển có thể tự động thích ứng với sự thay đổi của động học phương tiện và môi trường biển phức tạp, thay vì sử dụng các tham số cố định. Nghiên cứu tập trung giải quyết thách thức đặc thù của việc điều khiển AUV thiếu cơ cấu chấp hành, vốn đòi hỏi các chiến lược điều khiển gián tiếp và phức tạp

hơn so với loại đủ cơ cấu chấp hành. Do đó, bài báo đề xuất một giải pháp điều khiển vừa tối ưu hóa hiệu năng vừa đảm bảo khả năng thích ứng, cho nhiệm vụ giữ hướng của AUV thiếu cơ cấu chấp hành.

2. Mô hình động lực của học AUV

Mô hình động học của AUV mô tả mối quan hệ giữa vận tốc của AUV và sự thay đổi vị trí, hướng. Để tiến hành xây dựng mô hình động học của AUV thiếu cơ cấu chấp hành thực hiện điều khiển giữ hướng, ta giả thiết AUV chỉ di chuyển trên mặt phẳng ngang (bỏ qua chuyển động lên/xuống và nghiêng), mô hình động học có thể được biểu diễn như công thức (1).

Để mô tả chuyển động của AUV (Autonomous Underwater Vehicle - Phương tiện lặn tự hành) trong không gian ba chiều, ta cần thiết lập các hệ tọa độ và phương trình động học, động lực học. Đầu tiên, ta có hai hệ tọa độ chính: hệ tọa độ cố định gắn với trái đất $\{O_E, X_E, Y_E, Z_E\}$ và hệ tọa độ động gắn với thân AUV $\{O_B, X_B, Y_B, Z_B\}$ như Hình 1.



Hình 1. Các hệ tọa độ của AUV [3].

Vị trí của AUV trong hệ tọa độ cố định được biểu diễn bởi vector $\underline{\eta} = [x, y, z]^T$, hướng của AUV được mô tả bởi các góc Euler $\underline{\Theta} = [\phi, \theta, \psi]^T$ (roll - góc quay quanh trục x, pitch - góc quay quanh trục y, yaw - góc quay quanh trục z). Vận tốc của AUV bao gồm hai loại, vận tốc tuyến tính $\underline{v} = [u, v, w]^T$ và vận tốc góc $\underline{\omega} = [p, q, r]^T$.

Mối quan hệ giữa vận tốc và vị trí (hướng) của AUV được mô tả như phương trình (1).

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

Với: $\underline{\eta} = [x, y, z, \Phi, \theta, \Psi]$ là đạo hàm của vị trí và hướng của AUV; $J(\underline{\Theta})$ là ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ trên AUV sang hệ tọa độ cố định, và được định nghĩa như công thức (2).

$$J(\underline{\Theta}) = \begin{bmatrix} R(\Phi, \theta, \Psi) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & G(\Phi, \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Với:

$$R(\Phi, \theta, \Psi) = \begin{bmatrix} c\Psi \cdot c\theta & c\Psi \cdot s\theta \cdot s\Phi - s\Psi \cdot c\theta & c\Psi \cdot s\theta \cdot c\Phi + s\Psi \cdot s\Phi \\ s\Psi \cdot s\theta & s\Psi \cdot s\theta \cdot s\Phi + c\Psi \cdot c\theta & s\Psi \cdot s\theta \cdot c\Phi - c\Psi \cdot s\Phi \\ -s\theta & c\theta \cdot s\Phi & c\theta \cdot c\Phi \end{bmatrix} \quad \text{là}$$

ma trận quay để chuyển đổi vector vận tốc từ hệ tọa độ trên AUV sang hệ tọa độ cố định.

Ma trận: $G(\Phi, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & s\Phi \cdot t\theta & c\Phi \cdot t\theta \\ 0 & c\Phi & -s\Phi \\ 0 & s\Phi / c\theta & c\Phi / c\theta \end{bmatrix}$ là ma trận

chuyển đổi vận tốc góc từ tọa độ trên AUV sang hệ tọa độ cố định. Với các kí hiệu:

$c = \text{cosine}$, $s = \text{sine}$ và $t = \text{tan}$.

Phương trình động lực học của AUV mô tả chuyển động của AUV dưới tác dụng của các lực và mô men như phương trình (3).

$$M \cdot \dot{\underline{v}} + C(\underline{v}) \cdot \underline{v} + D(\underline{v}) \cdot \underline{v} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} \quad (3)$$

Trong đó, M là ma trận khối lượng và quán tính của AUV; $C(\underline{v})$ là ma trận Coriolis và lực ly tâm khi AUV quay; $D(\underline{v})$ là ma trận lực cản là lực chống lại chuyển động của AUV trong nước; $g(\underline{\eta})$ là vector lực phục hồi và giá trị này phụ thuộc vào vị trí và hướng của AUV; và $\underline{\tau}$ là vector lực và mô men điều khiển.

Các lực và mô men điều khiển này, $\underline{\tau} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ được tạo ra bởi các động cơ và bộ điều khiển của AUV, trong

đó X, Y, Z là các lực điều khiển theo các trục X_B, Y_B, Z_B và K, M, N là các mô men điều khiển quanh các trục này.

Đối với vấn đề điều khiển hướng cho AUV mô hình của AUV thường được rút gọn và chỉ quan tâm đến các chuyển động ngang (sway) và quay (yaw) như phương trình (4).

$$\begin{cases} \dot{v} = a_{11}.v + a_{12}.r + b_1.u_1 \\ \dot{r} = a_{21}.v + a_{22}.r + b_2.u_2 \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: v - vận tốc ngang; r - vận tốc góc quay và u_1, u_2 - các đầu vào điều khiển liên quan đến lực đẩy chênh lệch.

a_{11} là hệ số liên quan đến lực cản thủy động trong chuyển động ngang; a_{12} - hệ số liên quan đến ảnh hưởng của vận tốc quay lên chuyển động ngang; a_{21} là hệ số liên quan đến ảnh hưởng của vận tốc ngang lên chuyển động quay; a_{22} - là hệ số liên quan đến lực cản thủy động trong chuyển động quay; b_1 và b_2 là hệ số liên quan đến đầu vào điều khiển (lực đẩy từ các động cơ).

3. Thiết Kế Bộ Điều Khiển thích nghi GA-PID

3.1 Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) là một trong những phương pháp điều khiển phổ biến và hiệu quả, được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống tự động hóa, bao gồm cả phương tiện tự hành dưới nước (AUV). Trong trường hợp AUV thiếu cơ cấu chấp hành để thực hiện điều khiển giữ hướng, bộ điều khiển PID vẫn có thể được áp dụng để duy trì hướng di chuyển mong muốn thông qua việc điều chỉnh các tín hiệu điều khiển phù hợp. Sai lệch hướng (heading error) được định nghĩa là hiệu giữa hướng mong muốn (Ψ_d) và hướng thực tế (Ψ):

$$e(t) = \Psi_d(t) - \Psi \quad (5)$$

Bộ điều khiển PID tạo ra tín hiệu điều khiển là mô-men $\tau(t)$ dựa trên sai số $e(t)$:

$$\tau(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_D * \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Trong đó: K_p - Hệ số tỉ lệ (Proportional gain); K_i - Hệ số tích phân (Integral gain); K_D - Hệ số vi phân (Derivative gain).

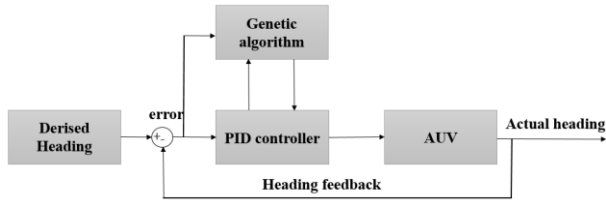
Các thông số của bộ điều khiển PID được tính chọn bằng phương pháp điều chỉnh Ziegler-Nichols [14]. Tuy nhiên, việc lựa chọn tham số PID tối ưu cho hệ thống AUV phức tạp và phi tuyến bằng các phương pháp truyền thống thường gặp khó khăn và có thể không đạt hiệu suất cao trong mọi điều kiện hoạt động. Do đó, một phương pháp tối ưu hóa dựa trên thuật toán di truyền sẽ được trình bày ở mục tiếp theo để tự động tìm kiếm bộ tham số (K_p, K_i, K_d) phù hợp nhất cho cấu trúc điều khiển PID này.

3.2. Tối ưu hóa tham số PID bằng giải thuật di truyền (GA)

3.2.1. Cấu trúc của hệ thống với bộ điều khiển GA-PID

Để bộ điều khiển PID (với thông số ban đầu được thiết kế tại mục 3.1) đã được tối ưu hóa bằng giải thuật di truyền (GA) có thể duy trì hiệu suất cao trong các điều kiện vận hành thực tế, vốn luôn thay đổi và khó dự đoán, một cơ chế thích nghi trực tuyến được tích hợp. Cơ chế này cho phép bộ điều khiển liên tục điều chỉnh các tham số (K_p, K_i, K_d) dựa trên phản hồi từ hệ thống, thay vì cố định các giá trị đã được tối ưu hóa ban đầu. Điều này đặc biệt quan trọng đối với AUV (Autonomous Underwater Vehicle) hoạt động trong môi trường biển phức tạp, nơi các yếu tố như dòng chảy, mật độ nước, và tải trọng của AUV có thể thay đổi theo thời gian và không gian. Sơ đồ cấu trúc của bộ

điều khiển GA-PID cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành thực hiện điều khiển giữ hướng được trình bày như Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển GA-PID cho AUV thực hiện điều khiển giữ hướng.

3.2.2. Quy trình thiết kế bộ điều khiển GA-PID

Quy trình thiết kế bộ điều khiển GA-PID trong nghiên cứu này bao gồm các bước chính sau đây, nhằm tìm ra bộ tham số (Kp, Ki, Kd) tối ưu cho cấu trúc PID đã xác định ở mục 3.1:

*** Xác định tham số và không gian tìm kiếm:** Ba tham số Kp, Ki, Kd của bộ điều khiển PID là các biến cần tối ưu. Một không gian tìm kiếm hợp lý, bao gồm khoảng giá trị chặn dưới và chặn trên cho từng tham số, cần được định nghĩa để giới hạn phạm vi hoạt động của GA, dựa trên hiểu biết về hệ thống hoặc các giá trị tham khảo ban đầu.

*** Lựa chọn và định nghĩa hàm mục tiêu:**

Để định lượng hiệu suất điều khiển và hướng dẫn quá trình tối ưu hóa, hàm mục tiêu J cần được xác định rõ. Một lựa chọn phổ biến và hiệu quả cho việc tối ưu tham số PID, nhằm đạt được đáp ứng nhanh, ổn định và sai số thấp, là tối thiểu hóa tiêu chuẩn lỗi tích phân theo trọng số thời gian (ITAE - Integral Time-weighted Absolute Error):

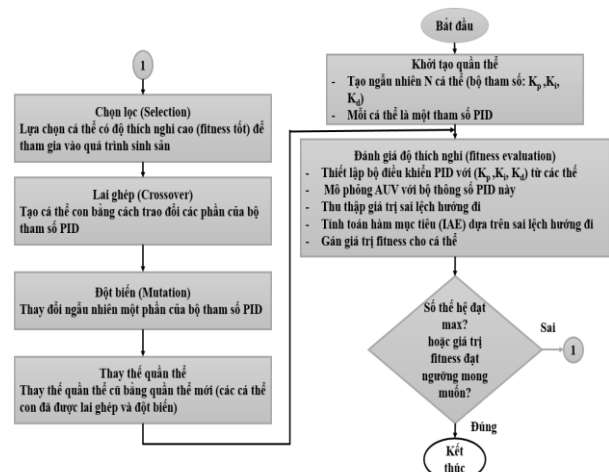
$$J_{ITAE} = \int_0^T t|e(t)|dt = \int_0^T t|\psi_d(t) - \psi(t)|dt \quad (7)$$

Trong đó T là khoảng thời gian mô phỏng đánh giá và e(t) là sai lệch hướng tức thời. Việc tối thiểu hóa JITAE có xu hướng tạo ra các đáp ứng ít dao động và thời gian xác lập ngắn.

*** Cấu hình tham số GA:** Các tham số vận hành của thuật toán GA cần được thiết lập, bao gồm kích thước quần thể (số lượng bộ (Kp, Ki, Kd) trong mỗi thế hệ), số thế hệ tối đa (điều kiện dừng thuật toán), phương pháp chọn lọc xác suất lai ghép và xác suất đột biến. Việc lựa chọn các tham số này ảnh hưởng đến khả năng và tốc độ hội tụ của thuật toán.

*** Thực thi vòng lặp tối ưu hóa GA:** Quá trình tìm kiếm tối ưu tuân theo lưu đồ thuật toán tổng quát được minh họa trong Hình 3. Điểm mấu chốt là bước "Đánh giá độ thích nghi": với mỗi bộ tham số PID (cá thể) trong quần thể, bộ điều khiển PID được cấu hình với các tham số này và chạy mô phỏng trên mô hình AUV trong một khoảng thời gian T. Dựa trên kết quả mô phỏng (đáp ứng sai lệch e(t)), giá trị hàm mục tiêu (JITAE) được tính toán, từ đó xác định độ thích nghi (fitness) của cá thể đó (thường là một hàm giảm của JITAE). Các toán tử chọn lọc, lai ghép, đột biến sau đó được áp dụng để tạo ra thế hệ kế tiếp tốt hơn.

*** Thu nhận kết quả tối ưu:** Sau khi thuật toán GA kết thúc (ví dụ: đạt đủ số thế hệ hoặc giá trị fitness không cải thiện đáng kể), bộ tham số (Kp, Ki, Kd) tương ứng với cá thể có độ thích nghi tốt nhất (giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất) được chọn làm kết quả tối ưu cho bộ điều khiển PID.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán của bộ điều khiển GA-PID.

Kết quả của quá trình tối ưu hóa GA là một bộ tham số PID (K_p , K_i , K_d) được coi là tối ưu (hoặc gần tối ưu) theo hàm mục tiêu đã định nghĩa, giúp bộ điều khiển PID đạt được hiệu suất tốt nhất cho nhiệm vụ điều khiển giữ hướng cho AUV. Sự kết hợp giữa PID và GA tạo ra một bộ điều khiển PID tự động, có khả năng thích nghi và tối ưu hóa hiệu suất mà không cần sự can thiệp thủ công của con người.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Thiết lập mô phỏng

Tiến hành mô phỏng thử nghiệm hoạt động của bộ điều khiển đề xuất với AUV Remus 100 với thông số kỹ thuật được trình bày trong Bảng 1 và thông số của bộ điều khiển PID (các thông số của bộ điều khiển PID được tính chọn theo phương pháp Ziegler–Nichols) và thông số bộ điều khiển GA-PID được trình bày trong Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 1. Thông số của AUV Remus [15].

| Thông số | Giá trị | Đơn vị |
|------------------|---------|-------------------|
| Chiều dài | 3.84 | m |
| Khối lượng | 30.48 | kg |
| Lực nổi | 306 | N |
| Moment quán tính | 3.45 | kg.m ² |

Bảng 2. Thông số của bộ điều khiển PID.

| K_p | K_i | K_d |
|-------|-------|-------|
| 50 | 0.1 | 10 |

Bảng 3. Thông số của bộ điều khiển GA.

| Tên thông số | Giá trị |
|---------------------|---------|
| Kích thước quần thể | 50 |
| Số lượng biến | 3 |
| Số thế hệ tối đa | 50 |
| Xác suất lai ghép | 0.8 |
| Xác suất đột biến | 0.3 |
| Hệ số đột biến | 0.2 |

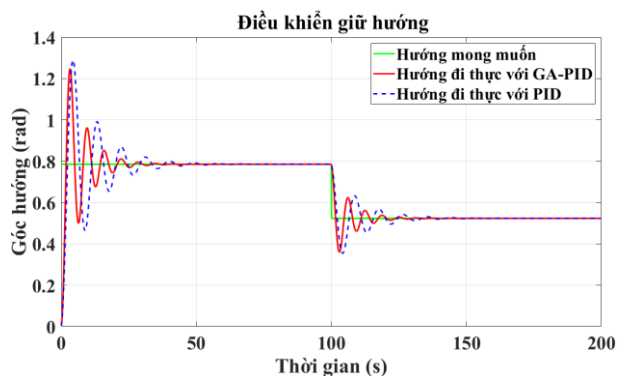
Tiến hành mô phỏng để kiểm tra hoạt động của bộ điều khiển đề xuất GA-PID. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển đề xuất được so sánh với bộ điều khiển PID, với hai kịch bản:

Kịch bản 1: Mô phỏng điều khiển giữ hướng cho AUV với tín hiệu hướng đi có dạng: trong khoảng thời gian từ 0 đến 100 giây tín hiệu đặt cho hướng đi là $\pi/4$ (rad), từ 101s đến 200s hướng đi là $\pi/6$ (rad).

Kịch bản 2: Mô phỏng điều khiển giữ hướng cho AUV với tín hiệu hướng đi có dạng hàm $\sin(0.1*t)$.

4.2. Kết quả mô phỏng

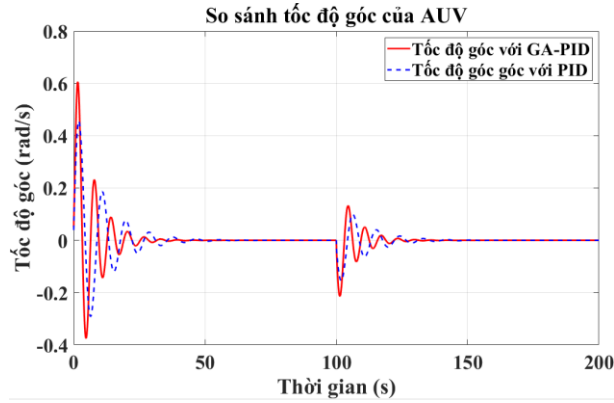
* **Kịch bản 1:** Các kết quả mô phỏng cho kịch bản thứ nhất được thể hiện trong các Hình 4-8.



Hình 4. Điều khiển giữ hướng cho AUV với kịch bản 1.

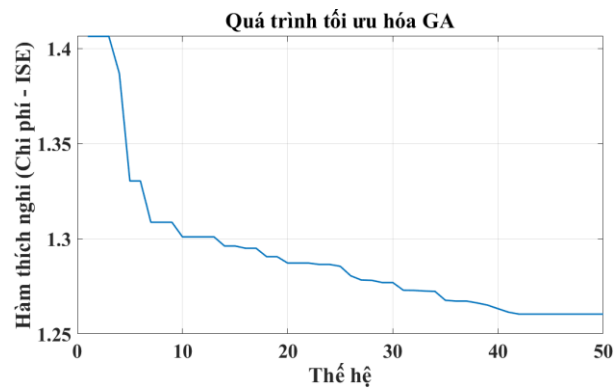
Hình 4 so sánh hiệu suất của hai bộ điều khiển PID và GA-PID. Từ hình vẽ ta thấy cả hai bộ điều khiển đều bám theo được hướng mong muốn sau các thay đổi điểm đặt (tại $t=0s$ và $t=100s$), nhưng có sự khác biệt rõ rệt về chất lượng đáp ứng. Bộ điều khiển GA-PID (đường màu đỏ) thể hiện đáp ứng tốt hơn với độ vọt lố thấp hơn và hệ thống có thời gian ổn định nhanh hơn đáng kể so với bộ điều khiển PID (đường chấm xanh dương). Đặc biệt sau khi thay đổi hướng mong muốn lần thứ hai ($t=100s$), GA-PID hội tụ về giá trị mới mượt mà hơn, trong khi PID dao động nhiều hơn và cần thời gian dài

hơn để ổn định. Nhìn chung, GA-PID cho thấy hiệu quả vượt trội trong việc giảm dao động và tăng tốc độ hội tụ so với PID thông thường.



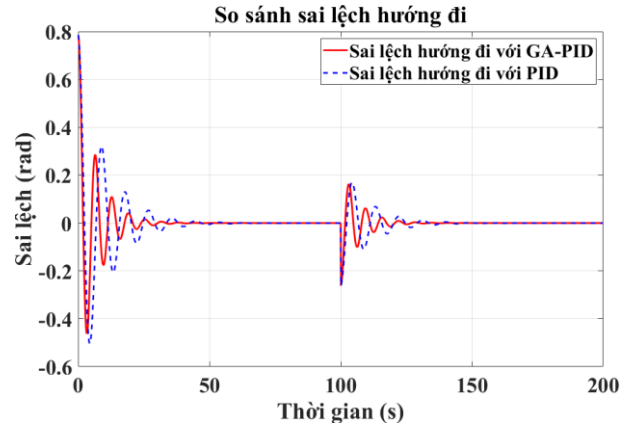
Hình 5. Vận tốc góc của AUV với kịch bản 1.

Hình 5 thể hiện vận tốc góc của AUV khi được điều khiển bởi GA-PID và PID. Kết quả cho thấy với bộ điều khiển PID (đường chấm xanh), hệ thống có tốc độ góc đỉnh lớn hơn và dao động kéo dài hơn sau mỗi lần thay đổi hướng mong muốn. Ngược lại, với bộ điều khiển GA-PID (đường màu đỏ) thì hệ thống có tốc độ góc đỉnh nhỏ hơn và ổn định nhanh hơn đáng kể sau mỗi lần AUV thay đổi hướng đi.



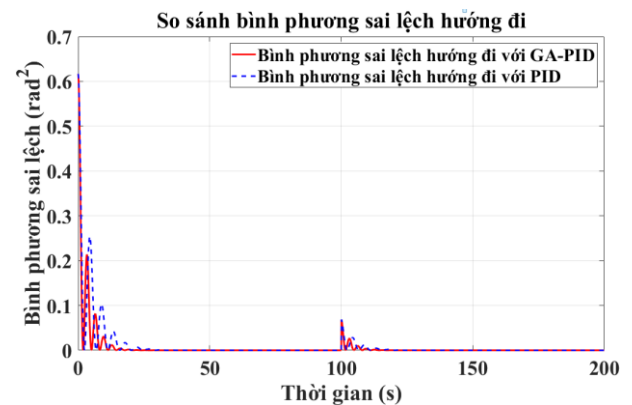
Hình 6. Quá trình tối ưu hóa GA với kịch bản 1.

Quá trình tối ưu hóa GA được thể hiện như hình vẽ 6, kết quả cho thấy GA đã hoạt động tốt. Nó đã tìm kiếm và cải thiện được các thông số của bộ điều khiển PID qua các thế hệ, và cuối cùng hội tụ về một giá trị chi phí thấp. Từ hình vẽ ta nhận thấy GA đã hội tụ sau khoảng 40 thế hệ.



Hình 7. Sai lệch hướng đi của AUV với kịch bản 1.

Hình 7 biểu diễn sai lệch hướng đi theo thời gian của hai bộ điều khiển. Ngay sau thời điểm ban đầu, sai lệch cực đại (vọt lố âm) của bộ điều khiển PID (chấm xanh) đạt khoảng -0.45 rad, lớn hơn đáng kể so với mức -0.25 rad của GA-PID (đường màu đỏ). Khi hướng mong muốn thay đổi tại $t=100$ s, sai lệch dương đỉnh của PID là khoảng $+0.2$ rad, cũng lớn hơn so với mức $+0.15$ rad của GA-PID. Nhìn chung, GA-PID giảm sai lệch về gần 0 nhanh hơn, từ hình vẽ ta thấy cần khoảng 25-30 giây ban đầu so với 35-40 giây của PID để sai lệch nằm trong một vùng nhỏ ổn định.

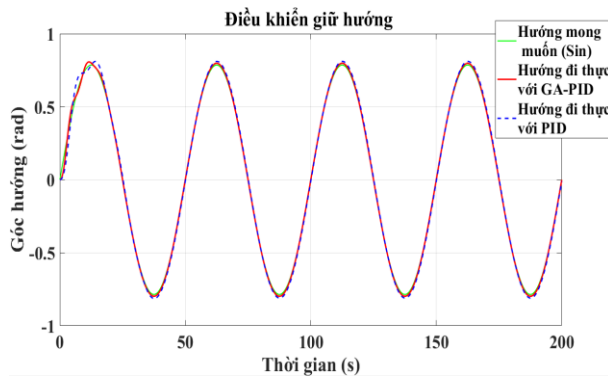


Hình 8. Bình phương sai lệch hướng đi của AUV với kịch bản 1.

Hình 8 thể hiện bình phương sai lệch hướng đi, một chỉ số đánh giá hiệu năng điều khiển. Ngay sau thời điểm ban đầu, bình phương sai lệch đỉnh của bộ điều khiển PID (đường nét đứt màu xanh) đạt khoảng 0.2 rad², cao hơn gấp 3 lần so với đỉnh của

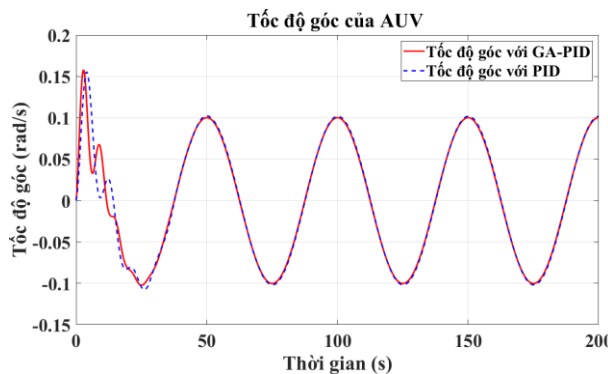
GA-PID (đường màu đỏ) chỉ khoảng 0.06 rad². Tương tự, tại thời điểm t=100s, đỉnh bình phương sai lệch của PID (~0.04 rad²) cũng cao gấp đôi so với GA-PID (~0.02 rad²), cho thấy GA-PID giảm thiểu sai lệch hiệu quả hơn hẳn trong suốt quá trình.

* **Kịch bản 2:** Các kết quả mô phỏng cho kịch bản thứ nhất được thể hiện trong các Hình 9-12.



Hình 9. Điều khiển giữ hướng cho AUV với kịch bản 2.

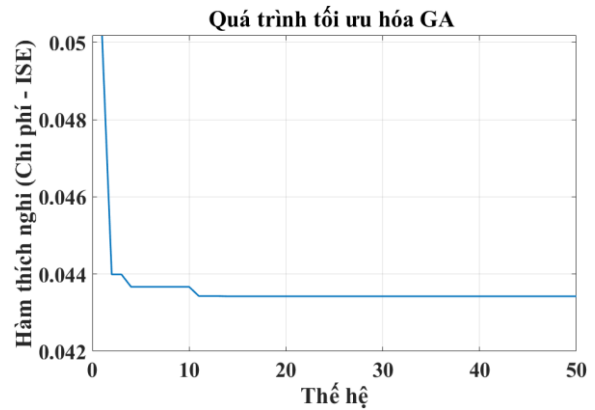
Hình 9 biểu diễn quá trình thực hiện điều khiển giữ hướng của AUV với hai bộ điều khiển GA-PID và PID khi bám theo một tín hiệu hình sin thay đổi liên tục. Có thể thấy rằng cả hướng đi thực tế với GA-PID (đường màu đỏ) bám hướng đi đặt tốt hơn so với bộ điều khiển PID (đường nét đứt màu xanh dương).



Hình 10. Vận tốc góc của AUV với kịch bản 2.

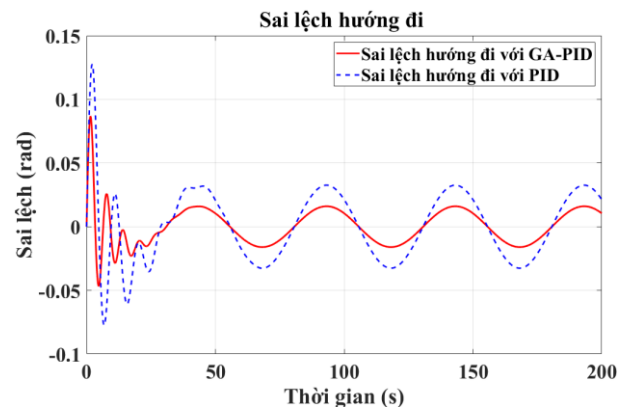
Hình 10 biểu diễn sự biến thiên vận tốc góc của AUV với hai bộ điều khiển GA-PID và PID. Từ hình vẽ ta thấy trong giai đoạn ban đầu, tốc độ góc của PID (đường màu

xanh ~0.16 rad/s) có giá trị lớn hơn so với tốc độ góc của GA-PID (đường màu đỏ, ~0.15 rad/s).



Hình 11. Quá trình tối ưu hóa GA với kịch bản 2.

Hình 11 thể hiện quá trình hội tụ của thuật toán di truyền (GA) khi tối ưu hóa bộ điều khiển PID, thể hiện giá trị hàm thích nghi (ở đây là chi phí ISE - Integral Squared Error) tốt nhất qua từng thế hệ. Giá trị hàm chi phí giảm rất nhanh trong khoảng 12 thế hệ đầu tiên, từ mức ban đầu gần 0.05 xuống mức tối ưu khoảng 0.0435. Sau thế hệ thứ 12, giá trị hàm chi phí không thay đổi đáng kể và giữ ổn định cho đến hết 50 thế hệ.



Hình 12. Sai lệch hướng đi của AUV với kịch bản 2.

Hình 12 biểu diễn sai số giữa hướng mong muốn và hướng thực tế của AUV theo thời gian, từ hình vẽ ta nhận thấy trong trạng thái ổn định (sau khoảng 30 giây), sai lệch của bộ điều khiển PID (đường màu xanh) dao động tuần hoàn với biên độ khoảng +/- 0.03 radian. Ngược lại, bộ điều khiển GA-PID (đường màu đỏ) duy trì được

sai lệch bám với biên độ dao động nhỏ hơn đáng kể, chỉ khoảng ± 0.015 radian. Như vậy, GA-PID đã giảm được biên độ sai lệch trạng thái ổn định xuống còn một nửa so với PID trong kịch bản này.

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày thành công việc thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển thích nghi GA-PID cho nhiệm vụ điều khiển giữ hướng của phương tiện tự hành dưới nước (AUV) thiếu cơ cấu chấp hành. Mô hình động học và động lực học của AUV đã được xây dựng làm cơ sở cho việc thiết kế bộ điều khiển. Hệ thống điều khiển GA-PID, với khả năng tự động tối ưu hóa các tham số Kp, Ki, Kd thông qua thuật toán di truyền, đã được triển khai và đánh giá hiệu quả qua phần mềm Matlab.

Kết quả mô phỏng qua hai kịch bản với tín hiệu đặt thay đổi dạng bước nhảy và dạng sin cho thấy bộ điều khiển GA-PID thể hiện hiệu suất vượt trội so với bộ điều khiển PID truyền thống. Cụ thể, trong kịch bản tín hiệu thay đổi đột ngột, GA-PID cho thấy khả năng bám theo hướng mong muốn tốt hơn, mặc dù vẫn còn hiện tượng vọt lố và thời gian xác lập tương đối dài. Tuy nhiên, trong kịch bản tín hiệu thay đổi dạng sin, bộ điều khiển GA-PID được tối ưu hóa đã loại bỏ gần như hoàn toàn vọt lố và dao động, đạt được thời gian xác lập nhanh và độ chính xác cao. Sự khác biệt này cho thấy khả năng thích ứng tốt hơn của GA-PID với các tín hiệu thay đổi mượt mà hơn.

Nhìn chung, bộ điều khiển GA-PID chứng tỏ khả năng cải thiện đáng kể hiệu suất điều khiển giữ hướng cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành, đặc biệt trong môi trường biển phức tạp và các điều kiện hoạt động thay đổi. Phương pháp này mở ra tiềm năng ứng dụng thực tế trong việc phát triển các hệ thống điều khiển tự động tiên tiến cho AUV,

phục vụ hiệu quả cho các nhiệm vụ khảo sát, giám sát và thăm dò dưới nước.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Đỗ Khắc Tiệp: Nghiên cứu xây dựng mô hình AUV thiếu cơ cấu chấp hành, thiết kế bộ điều khiển và viết bản thảo gốc. **Nguyễn Văn Tiến:** Xây dựng mô hình mô phỏng, tổng hợp các kết quả. **Tống Lâm Tùng:** Đánh giá dữ liệu mô phỏng, chỉnh sửa bản thảo.

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

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

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 24.25-55.

1st Đỗ Khắc Tiệp. *Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

2nd Nguyễn Văn Tiến. *Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

3rd Tống Lâm Tùng. *Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

*Corresponding author: dokhactiep@vimaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Yuh, "Design and control of autonomous underwater robots: A survey," *Autonomous Robots*, vol. 8, no. 1, pp. 7–24, Jan. 2000. doi: [10.1023/A:1008984701078](https://doi.org/10.1023/A:1008984701078).
- [2] M. F. Yahya, M. R. Arshad, and M. H. A. Majid, "Responsive surging, heading and diving controls of autonomous underwater vehicle based on brute forcing and smoothing of controllers," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, vol. 50, no. 11, pp. 884–889, 2021.

- [3] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, Chichester, UK: Wiley, 2011.
- [4] D. A. Smallwood and L. L. Whitcomb, "Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicles: Theory and experiment," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 169–186, Jan. 2004, doi: [10.1109/JOE.2003.823312](https://doi.org/10.1109/JOE.2003.823312).
- [5] Z. Yan, M. Wang, & J. Xu, "Robust adaptive sliding mode control of underactuated autonomous underwater vehicles with uncertain dynamics". *Ocean Engineering*, vol. 173, pp. 802–809, 2019, doi: [10.1016/j.oceaneng.2019.01.008](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.008).
- [6] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Chichester, UK: Wiley, 1994.
- [7] X. Wu, D. Jiang and et al, "Attitude stabilization control of autonomous underwater vehicle based on decoupling algorithm and PSO-ADRC," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 10, Feb. 2022. doi: [10.3389/fbioe.2022.843020](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.843020).
- [8] J. Zhou, X. Zhao, T. Chen, Z. Yan, & Z. Yang, "Trajectory Tracking Control of an Underactuated AUV Based on Backstepping Sliding Mode with State Prediction," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181983–181993, 2019, doi: [10.1109/access.2019.2958360](https://doi.org/10.1109/access.2019.2958360).
- [9] B. Wu, X. Han, & N. Hui, "System Identification and Controller Design of a Novel Autonomous Underwater Vehicle," *Machines*, vol. 9, no. 6, p. 109, 2021. doi: [10.3390/machines9060109](https://doi.org/10.3390/machines9060109).
- [10] W. Caharija, K. Y. Pettersen, M. Bibuli, P. Calado, E. Zereik, J. Braga, et al, "Integral Line-of-Sight Guidance and Control of Underactuated Marine Vehicles: Theory, Simulations, and Experiments," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 5, pp. 1623 – 1642, Sep. 2016. doi: [10.1109/TCST.2015.2504838](https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2504838).
- [11] D. A. Nguyen, D. T. Do, T. T. Nguyen, & V. A. Pham, "Fuzzy Controller Design for Autonomous Underwater Vehicles Path Tracking," *2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2019, doi: [10.1109/ICSSE.2019.8823333](https://doi.org/10.1109/ICSSE.2019.8823333).
- [12] H. Saari, M. Djemai "Ship motion control using multi-controller structure," *Ocean Engineering*, vol. 55, pp. 184–190, 2012, doi: [10.1016/j.oceaneng.2012.07.028](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.07.028).
- [13] O. K. Erol, I. Eksin, "A new optimization method: Big Bang–Big Crunch," *Advances in Engineering Software*, vol. 37, no. 2, pp. 106–111, Feb. 2006, doi: [10.1016/j.advengsoft.2005.04.005](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.04.005).
- [14] N. I. Giannoccaro, G. Manieri, P. Martina, & T. Sakamoto, "Genetic algorithm for decentralized PI controller tuning of a multi-span web transport system based on overlapping decomposition," *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, 2017, doi: [10.1109/ASCC.2017.8287306](https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287306).
- [15] A. Chemori, K. Kuusmik, T. Salumae, & M. Kruusmaa, "Depth control of the biomimetic U-CAT turtle-like AUV with experiments in real operating conditions," *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, doi: [10.1109/icra.2016.7487677](https://doi.org/10.1109/icra.2016.7487677).
- [16] R. A. Krohling, J. P. Rey, "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, no. 1, pp. 78–82, Feb. 2001, doi: [10.1109/4235.910467](https://doi.org/10.1109/4235.910467).
- [17] A. Jayachitra, R. Vinodha, "Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning Approach for Continuous Stirred Tank Reactor," *Advances in Artificial Intelligence*, vol. 5, pp. 1–8, 2014, doi: [10.1155/2014/791230](https://doi.org/10.1155/2014/791230).