

ĐIỀU KHIỂN DI CHUYỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHO PHƯƠNG TIỆN NỔI TỰ HÀNH HỤT DẪN ĐỘNG DỰA TRÊN KỸ THUẬT MÔ HÌNH DỰ BÁO PHI TUYẾN

PATH-FOLLOWING CONTROL FOR UNDER-ACTUATED AUTONOMOUS SURFACE VEHICLES
BASED ON NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL

Cao Đức Sáng¹, Trần Văn Quốc²,
Lê Trần Thắng¹, Nguyễn Trọng Khuyên^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.055>

TÓM TẮT

Di chuyển bám quỹ đạo là một trong những bài toán quan trọng trong điều khiển phương tiện thủy tự hành vì có nhiều ứng dụng trong thực tế. So với các phương tiện di chuyển trên mặt đất, việc điều khiển phương tiện thủy tự hành di chuyển bám quỹ đạo trở nên khó khăn hơn nhiều, đặc biệt là với phương tiện hút dẫn động. Để điều khiển phương tiện di chuyển bám quỹ đạo, cần thiết kế luật dẫn và luật điều khiển. Luật dẫn có nhiệm vụ xác định các giá trị tham chiếu như vị trí, vận tốc. Luật điều khiển thiết kế lực để điều khiển đưa phương tiện tiến đến giá trị tham chiếu, từ đó hội tụ đến quỹ đạo cần bám. Phần lớn các phương tiện thủy thường bị hút dẫn động theo phương ngang, điều này làm cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo trở nên khó khăn hơn. Để giải quyết hút dẫn động, trong bài báo này nhóm tác giả thay đổi điểm điều khiển, xác định lại mô hình động lực cho điểm điều khiển mới. Bài báo cũng giới thiệu luật dẫn và đưa ra chứng minh để đảm bảo phương tiện hội tụ đến quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển được xây dựng dựa trên kỹ thuật mô hình dự báo phi tuyến (Nonlinear Model Predictive Control), có tính đến các ràng buộc đầu vào điều khiển. Các kết quả mô phỏng được thực hiện trên Matlab chứng minh tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: Phương tiện nổi tự hành; phương tiện hút dẫn động; điều khiển mô hình dự báo phi tuyến.

ABSTRACT

Path-following control is one of the most important problems in controlling autonomous water vehicles because it has many practical applications. Compared with vehicles moving on the ground, controlling autonomous water vehicles to follow a trajectory becomes much more difficult, especially with vehicles that are under-actuated. To control a vehicle to follow a path, it is necessary to design a guidance law and a control law. The guidance law is responsible for determining reference values, such as position and velocity. The control law designs the force to control the vehicle to the reference value, thereby converging to the desired trajectory. Most water vehicles often have lateral underactuation, which makes the trajectory tracking control problem more difficult. To solve this problem, in the article, the authors change the control point and redefine the dynamic model for this new control point. The article also introduces the guidance law and provides proof to ensure that the vehicle converges to the desired trajectory. The force controller is built based on Nonlinear Model Predictive Control technique, taking into account the control input constraints. Simulation results performed on Matlab demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Autonomous Surface Vehicle (ASV); Under-actuated Vehicle; Nonlinear Model Predictive Control (NMPC).

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự

²Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: nguyentk126@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/10/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/01/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phương tiện thủy tự hành đã, đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong mấy thập niên trở lại cho các nhiệm vụ trên biển, đại dương [1]. Do không có sự tham gia trực tiếp của người điều khiển nên có thể tối ưu phương tiện thủy tự hành về kích thước, chi phí sản xuất, vận hành, đảm bảo sẵn sàng hoạt động trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt, nguy hiểm. Di chuyển bám quỹ đạo là một trong những bài toán quan trọng nhất trong điều khiển AUV/ASV, cho phép ASV/AUV di chuyển theo quỹ đạo xác định trước khi thực hiện các nhiệm vụ trên biển (hoạt động cứu nạn, vẽ bản đồ, nghiên cứu đại dương) [2]. Khác với các phương tiện trên mặt đất có lực ma sát với mặt đường lớn, giữ phương tiện bám quỹ đạo khi vào cua, thủy lực tác động lên phương tiện thủy là không lớn, làm cho phương tiện dễ bị trượt. Điều này làm cho việc điều khiển phương tiện thủy tự hành bám quỹ đạo trở nên khó khăn, đặc biệt với phương tiện hút dẫn động.

Trong công trình [3], tác giả phát triển bộ điều khiển cho ASV (Autonomous Surface Vehicle) dựa trên kỹ thuật trượt backstepping và kỹ thuật DSC (Dynamic Surface Control). Tuy nhiên công trình dừng lại ở bài toán bám quỹ đạo cho đối tượng ASV đầy đủ dẫn động. Do ảnh hưởng của hàm dấu, luật điều khiển trong bộ điều khiển trượt backstepping bị dao động. Trong công trình [4], tác giả sử dụng kỹ thuật TMPC (Tube-based Model Predictive Control) để điều khiển phương tiện đầy đủ dẫn động di chuyển bám quỹ đạo trong điều kiện có vật cản. Để giải quyết bài toán hút dẫn động, một số công trình kết hợp luật dẫn LOS (Line of Sight) với một luật điều khiển cụ thể [5-7]. Phương pháp LOS xác định luật thay đổi góc hướng của phương tiện thủy hướng đến một điểm ngắm ảo nằm phía trước điểm tham chiếu một khoảng cách cố định. Nghiên cứu trong [8] sử dụng luật dẫn PP (Pure Pursuit), trong đó phương tiện luôn được điều khiển hướng đến mục tiêu cần bám. Phương pháp này thường được sử dụng trong các nhiệm vụ bám đuổi, đơn giản, dễ triển khai, tuy nhiên khả năng bám theo quỹ đạo và ổn định kém. Các nghiên cứu [9] sử dụng kỹ thuật VF (Vector Field) cho luật dẫn. Phương pháp này không yêu cầu điểm ngắm ảo như luật dẫn LOS, thay vào đó tạo một trường véc tơ vận tốc xung quanh quỹ đạo mong muốn. Véc tơ vận tốc tại một vị trí sẽ chỉ ra hướng mong muốn của phương tiện tại vị trí đó. Với luật điều khiển, có thể sử dụng kỹ thuật điều khiển PID [10, 11]. Phương pháp này sử dụng tương đối phổ biến trước đây cho phương tiện thủy. Trong [12], bộ điều khiển SMC được thiết kế dành cho luật dẫn và luật điều khiển. Phương pháp này xử lý được yếu

tổ nhiễu và tính không chắc chắn trong mô hình, tuy nhiên nó lại gây hiện tượng rung trong điều khiển. Một phương pháp khác dựa trên kỹ thuật backstepping được sử dụng tương đối hiệu quả để thiết kế bộ điều khiển lực cho ASV [13, 14]. Các phương pháp nói trên đã giải quyết được bài toán di chuyển bám quỹ đạo, tuy nhiên, việc thiết kế luật điều khiển chưa tính đến các ràng buộc thực tế đối với đầu vào, đầu ra.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả trình bày phương pháp điều khiển phương tiện nổi hút dẫn động di chuyển bám quỹ đạo dựa trên việc thiết kế luật dẫn và thiết kế bộ điều khiển sử dụng kỹ thuật mô hình dự báo phi tuyến (NMPC). Để giải quyết vấn đề hút dẫn động, nhóm tác giả đề xuất thay đổi điểm điều khiển trên ASV, từ đó khuếch đại lực điều khiển thành phần dạt ngang (thành phần không có dẫn động). Bộ điều khiển NMPC cho phép tối ưu lực điều khiển, có tính đến các điều kiện ràng buộc đầu vào. Các phần tiếp theo của bài báo bao gồm: Mục 2 trình bày mô hình động lực của phương tiện hút dẫn động, thiết kế luật dẫn, thiết kế bộ điều khiển NMPC; Mục 3 trình bày các kết quả mô phỏng; Mục 4 đưa ra kết luận.

2. ĐIỀU KHIỂN DI CHUYỂN BẮM QUỸ ĐẠO

2.1. Mô hình động lực của phương tiện nổi hút dẫn động

Với phương tiện thủy tự hành trên mặt nước với ba bậc tự do (tiến, dạt ngang, quay hướng), mô hình động lực học [2]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau + w \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $\eta = [x, y, \psi]^T$ - véc tơ biểu diễn tọa độ và hướng của phương tiện biểu diễn trong hệ tọa độ dẫn đường; $v = [u, v, r]^T$ - véc tơ vận tốc của phương tiện biểu diễn trong hệ tọa độ liên kết (hệ tọa độ có các trục gắn với ASV, cụ thể trục x trùng với trục dọc thân, hướng về phía mũi ASV, trục y hướng từ mạn trái qua mạn phải, trục z hướng từ lưng đến bụng ASV); $R(\psi)$ - ma trận chuyển hệ trục tọa độ liên kết sang hệ trục tọa độ dẫn đường xác định bởi góc phương vị ψ của phương tiện:

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

M , C , D lần lượt là ma trận quán tính, ma trận Coriolis và ma trận Damping:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13}(\mathbf{v}) \\ 0 & 0 & c_{23}(\mathbf{v}) \\ -c_{13}(\mathbf{v}) & -c_{23}(\mathbf{v}) & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11}(\mathbf{v}) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(\mathbf{v}) & d_{23}(\mathbf{v}) \\ 0 & d_{32}(\mathbf{v}) & d_{33}(\mathbf{v}) \end{bmatrix}$$

$\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3]^T$ - véc tơ biểu diễn nhiễu tác động, $\boldsymbol{\tau}$ - véc tơ biểu diễn lực điều khiển và mô men. Với phương tiện hút dẫn động ngang, $\boldsymbol{\tau} = [F, 0, T]$. Đặt

$$\mathbf{N} = \mathbf{C} + \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & c_{13} \\ 0 & d_{22} & c_{23} + d_{23} \\ -c_{13} & -c_{23} + d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & n_{13} \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} \end{bmatrix}.$$

Khai triển (1) ta có:

$$\dot{u} = \left(-\frac{n_{11}}{m_{11}}u - \frac{n_{13}}{m_{11}}r \right) + \frac{F}{m_{11}} + \frac{w_1}{m_{11}} = f_1 + b_1 F + \delta_1 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \frac{1}{m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}} \begin{bmatrix} m_{33} & -m_{23} \\ -m_{32} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\begin{bmatrix} n_{22} & n_{23} \\ n_{32} & n_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \\ 0 \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hay:

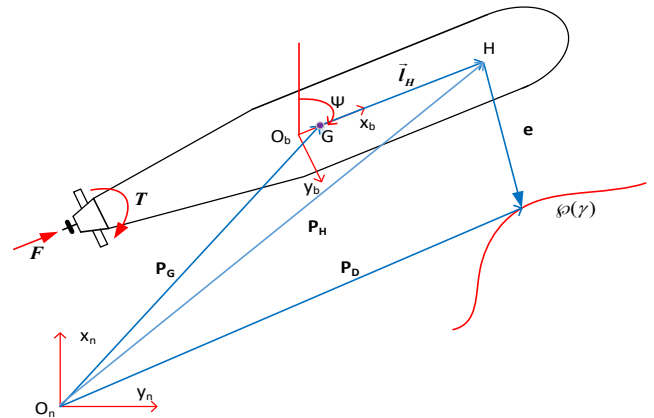
$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{(m_{23}n_{32} - m_{33}n_{22})v + (m_{23}n_{33} - m_{33}n_{23})r}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} \\ &+ \frac{-m_{23}T}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} + \frac{m_{33}w_2 - m_{23}w_3}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} \\ &= f_2 + b_2 T + \delta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \frac{(m_{32}n_{22} - m_{22}n_{32})v + (m_{32}n_{23} - m_{22}n_{33})r}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} \\ &+ \frac{m_{22}T}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} + \frac{-m_{32}w_2 + m_{22}w_3}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}} \\ &= f_3 + b_3 T + \delta_3 \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{m_{11}}; \delta_1 = \frac{w_1}{m_{11}}; f_1 = -\frac{n_{11}}{m_{11}}u - \frac{n_{13}}{m_{11}}r; \\ b_2 &= \frac{-m_{23}}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}; \delta_2 = \frac{m_{33}w_2 - m_{23}w_3}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}; \\ f_2 &= \frac{(m_{23}n_{32} - m_{33}n_{22})v + (m_{23}n_{33} - m_{33}n_{23})r}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}; \\ b_3 &= \frac{m_{22}}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}; \delta_3 = \frac{-m_{32}w_2 + m_{22}w_3}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}; \\ f_3 &= \frac{(m_{32}n_{22} - m_{22}n_{32})v + (m_{32}n_{23} - m_{22}n_{33})r}{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}. \end{aligned}$$

Do yếu tố hút dẫn động, không thể điều khiển hai thành phần v, r một cách độc lập. Trong thực tế $m_{23} \ll m_{22}$, do đó $b_2 T \ll b_3 T$, có nghĩa thành phần điều khiển tham gia vào chuyển động theo phương ngang nhỏ. Để giải quyết vấn đề này, ta thay đổi điểm điều khiển, chọn điểm điều khiển mới H (hình 1). Điểm này nằm trên trục dọc thân và ở phía trước điểm trọng tâm của phương tiện. Trong bài toán điều khiển ASV, thay vì điều khiển điểm G bám quỹ đạo, chúng ta điều khiển điểm H. Thành phần điều khiển ở đây là lực F và mô men T, còn thành phần theo phương dọc ngang (phương trục y_b) không có dẫn động.



Hình 1. Mô hình ASV hút dẫn động với điểm điều khiển H trong bài toán bám quỹ đạo trên mặt nước

Trên hình 1, H là điểm điều khiển quan tâm, $\mathbf{P}_H, \mathbf{P}_G, \mathbf{P}_D$ lần lượt là tọa độ xác định trong hệ tọa độ dẫn đường (n-frame) của điểm H, trọng tâm G và vị trí mong muốn của ASV trên quỹ đạo cần bám. Khi thay đổi điểm điều khiển, mô hình động lực của phương tiện thay đổi.

Đặt $\bar{\mathbf{l}}_H$ - véc tơ nối từ điểm trọng tâm G đến điểm H.

Theo động học vật rắn, ta có: $\dot{\mathbf{v}}_H = \dot{\mathbf{v}}_G + \dot{\mathbf{r}} \times \bar{\mathbf{l}}_H$; suy ra $\ddot{\mathbf{a}}_H = \dot{\mathbf{v}}_G + \dot{\mathbf{r}} \times \bar{\mathbf{l}}_H + \dot{\mathbf{r}} \times \dot{\bar{\mathbf{l}}}_H = \dot{\mathbf{v}}_G + \dot{\mathbf{r}} \times \bar{\mathbf{l}}_H - r^2 \bar{\mathbf{l}}_H$. Ở đây, G là điểm trọng tâm của phương tiện; $\dot{\mathbf{r}}$ - véc tơ vận tốc góc; $\dot{\mathbf{v}}_G, \dot{\mathbf{v}}_H$ - lần lượt là véc tơ vận tốc dài của điểm G và điểm H so với hệ quy chiếu dẫn đường. Chiếu phương trình véc tơ của vận tốc lên hệ tọa độ liên kết, ta có:

$$\mathbf{v}_H^b = \mathbf{v}_G^b + \begin{bmatrix} 0 & -r & 0 \\ r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Lr \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

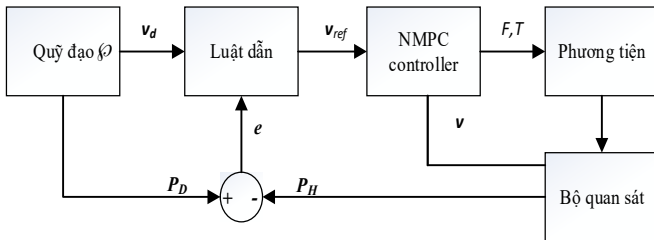
Trong mặt phẳng chuyển động, biểu thức này có thể rút gọn: $\mathbf{v}_H^b = \begin{bmatrix} u_H \\ v_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v + Lr \end{bmatrix}$. Tương tự, chiếu phương trình véc tơ biểu diễn gia tốc lên hệ tọa độ liên kết:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_H^b &= \begin{bmatrix} \dot{u}_H \\ \dot{v}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} - r^2 L \\ \dot{v} + r L \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (f_1 - r^2 L) + b_1 F + \delta_1 \\ (f_2 + f_3 L) + (b_2 + b_3 L) T + (\delta_2 + \delta_3 L) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Với phép biến đổi này, có thể thấy, thành phần lực tham gia vào chuyển động ngang được khuếch đại.

2.2. Thiết kế luật dẫn

Trong bài toán điều khiển di chuyển bám quỹ đạo, bộ điều khiển được thiết kế gồm hai vòng. Vòng ngoài đưa ra luật dẫn xác định vận tốc tham chiếu để phương tiện bám theo. Vòng trong liên quan đến lực điều khiển. Ở vòng này, luật điều khiển được thiết kế lực để lái vận tốc phương tiện bám theo giá trị vận tốc tham chiếu, từ đó, phương tiện di chuyển bám theo quỹ đạo cho trước mong muốn.



Hình 2. Sơ đồ khối điều khiển bám quỹ đạo

Quỹ đạo ρ trên mặt phẳng ngang được mô tả bởi hàm của tham số γ , với $\gamma \in [\alpha, \beta]$, $\gamma = \gamma(t)$. Ở đây biến chạy γ thay đổi giá trị từ α đến β , biến chạy γ có thể là thời gian (khi đó quy về bài toán trajectory tracking), hoặc có thể là độ dài quãng đường. Khi $\gamma = \alpha$, xác định tọa độ điểm xuất phát của quỹ đạo, khi $\gamma = \beta$ xác định tọa độ điểm kết thúc của quỹ đạo. Khi thiết kế luật dẫn, ta cần xem xét tham số này thay đổi theo thời gian. Điểm P_H ở đây là tọa độ thực tế của ASV, còn P_D là tọa độ mong muốn của ASV trên quỹ đạo. Trong hệ tọa độ dẫn đường, tại thời điểm t , tọa độ thực tế của điểm điều khiển H là $P_H(t)$; Đặt $P_D(t) = P(\gamma_D(t))$ - tọa độ của vị trí mong muốn trên quỹ đạo. Đặt: $\mathbf{e} = \mathbf{P}_D - \mathbf{P}_H$, sai lệch tọa độ giữa vị trí thực tế và vị trí mong muốn. Trong hệ tọa độ dẫn đường, vận tốc mong muốn được xác định:

$\mathbf{v}_D = \frac{d\mathbf{P}_D}{dt} = \frac{d\mathbf{P}_D}{d\gamma_D} \frac{d\gamma_D}{dt} = \mathbf{P}'_{\gamma=\gamma_D} \dot{\gamma}_D = \mathbf{P}'_D \dot{\gamma}_D$. Khi giữa phương tiện và vị trí mong muốn sai lệch một khoảng cách $\mathbf{e}$, để phương tiện bám vị trí mong muốn thì đó vận tốc tương đối của phương tiện so với điểm tham chiếu phải có hướng của $\mathbf{e}$ (đến vị trí mong muốn). Đặt $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$,

với $k_1 > 0, k_2 > 0$. Vận tốc tham chiếu của phương tiện có thể được thiết kế:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{ref} = \mathbf{v}_D + \mathbf{K}\mathbf{e} = \mathbf{P}'_D \dot{\gamma}_D + \mathbf{K}\mathbf{e} \\ \mathbf{v}_{ref}^b = \mathbf{R}^T(\psi) \mathbf{v}_{ref} \end{cases} \quad (9)$$

Ta chứng minh khi $\mathbf{v}_H \rightarrow \mathbf{v}_{ref}$, thì sai số $\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$, tức điểm H sẽ hội tụ về vị trí mong muốn D khi thời gian tăng lên. Thật vậy: Xét hàm LFC (Lyapunov Function Candidate): $V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e}$.

Ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{e}^T \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{e}^T (\dot{\mathbf{P}}_D - \dot{\mathbf{P}}_H) = \mathbf{e}^T (\dot{\mathbf{P}}_D - \mathbf{v}_{ref} + \mathbf{v}_{ref} - \dot{\mathbf{P}}_H) \\ &= -\mathbf{e}^T \mathbf{K}\mathbf{e} + \mathbf{e}^T (\mathbf{v}_{ref} - \dot{\mathbf{P}}_H) \end{aligned}$$

Với giả thiết $\mathbf{v}_H \rightarrow \mathbf{v}_{ref}$, suy ra $\dot{V} \rightarrow -\mathbf{e}^T \mathbf{K}\mathbf{e} \leq 0$ (chú ý ma trận $\mathbf{K}$ xác định dương). Do $V \geq 0$ và $\dot{V}$ liên tục và bị chặn, suy ra $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = \lim_{t \rightarrow \infty} -\mathbf{e}^T \mathbf{K}\mathbf{e} = 0$ (theo bổ đề Barbalat), suy ra $\mathbf{e} \rightarrow \mathbf{0}$. Sai số dẫn tới 0 theo thời gian đảm bảo phương tiện sẽ di chuyển hội tụ đến quỹ đạo tham chiếu.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển NMPC

Đặt véc tơ trạng thái: $\mathbf{X} = [u_H \quad v_H \quad r]^T$. Ta có:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} u_H \\ v_H \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v + Lr \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} &= \mathbf{H}^{-1} \mathbf{X}; \mathbf{H}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \dot{\mathbf{X}} &= \begin{bmatrix} \dot{u}_H \\ \dot{v}_H \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f_1 - r^2 L) + b_1 F + \delta_1 \\ (f_2 + f_3 L) + (b_2 + b_3 L) T + (\delta_2 + \delta_3 L) \\ f_3 + b_3 T + \delta_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f_1 - r^2 L \\ f_2 + f_3 L \\ f_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 + b_3 L \\ 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 + \delta_3 L \\ \delta_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Hay

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{W} \quad (10)$$

Ở đây:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= [\nabla(f_1 - r^2 L) \quad \nabla(f_2 + f_3 L) \quad \nabla f_3]^T \mathbf{H}^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} a_{1u} & a_{1v} & a_{1r} - L(r + a_{1v}) \\ a_{2u} + La_{3u} & a_{2v} + La_{3v} & a_{2r} + L(a_{3r} - a_{2v} - La_{3v}) \\ a_{3u} & a_{3v} & a_{3r} - La_{3v} \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$a_{1u} = -n_{11}/m_{11}; a_{1v} = 0; a_{1r} = -n_{13}/m_{11};$$

$$\begin{aligned} a_{2u} &= 0; a_{2v} = (m_{23}n_{32} - m_{33}n_{22}) / (m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}); \\ a_{2r} &= (m_{23}n_{33} - m_{33}n_{23}) / (m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}); \\ a_{3u} &= 0; a_{3v} = (m_{32}n_{22} - m_{22}n_{32}) / (m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}); \\ a_{3r} &= (m_{32}n_{23} - m_{22}n_{33}) / (m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}); \end{aligned}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 + b_3 L \\ 0 & b_3 \end{bmatrix}; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 + \delta_3 L \\ \delta_3 \end{bmatrix}; \mathbf{U} = [\mathbf{F} \quad \mathbf{T}]^T.$$

Gọi Δ_t - thời gian lấy mẫu. Rời rạc hóa (10) ta có:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + (\mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{U}_k + \mathbf{W}_k) \Delta_t \quad (11)$$

Mô hình đầu ra $\mathbf{Y}$ (bao gồm u_H, v_H, r) được mô tả bởi (12):

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{I}_{3 \times 3} \mathbf{X}_k + \mathbf{O}_{3 \times 2} \mathbf{U}_k \quad (12)$$

Gọi N - độ dài dự báo. Giả sử tại thời điểm $t = t_k$ trạng thái hệ thống là $\mathbf{X}_k$; Kí hiệu: $\{\mathbf{U}_{k+1|k}, \mathbf{U}_{k+2|k}, \dots, \mathbf{U}_{k+N|k}\}$ chuỗi điều khiển giả định tiếp theo trong kỹ thuật NMPC; $\{\mathbf{X}_{k+1|k}, \mathbf{X}_{k+2|k}, \dots, \mathbf{X}_{k+N|k}\}$ - chuỗi trạng thái thu được tương ứng; $\{\mathbf{Y}_{k+1|k}, \mathbf{Y}_{k+2|k}, \dots, \mathbf{Y}_{k+N|k}\}$ - chuỗi đầu ra tương ứng. Đặt $\mathbf{Z}_k = [\mathbf{U}_{k+1|k}^T \quad \mathbf{U}_{k+2|k}^T \quad \dots \quad \mathbf{U}_{k+N|k}^T]^T$. Hàm chi phí J được xác định:

$$J(\mathbf{Z}_k) = J_Y(\mathbf{Z}_k) + J_U(\mathbf{Z}_k) + J_{\Delta U}(\mathbf{Z}_k) \quad (13)$$

$$\text{Trong đó: } J_Y = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{w_{Yij}}{s_{Yj}} \left(Y_{j(k+i|k)} - Y_{j(k+i|k)}^{\text{ref}} \right) \right)^2,$$

$$J_U = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{w_{Uij}}{s_{Uj}} \left(U_{j(k+i|k)} - U_{j(k+i|k)}^{\text{ref}} \right) \right)^2,$$

$$J_{\Delta U} = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=2}^N \left(\frac{w_{\Delta Uij}}{s_{\Delta Uj}} \left(U_{j(k+i|k)} - U_{j(k+i-1|k)} \right) \right)^2;$$

$\mathbf{Y}^{\text{ref}} = \mathbf{v}_{\text{ref}}$; $\mathbf{U}^{\text{ref}} = [0, 0]^T$; $w_{Yij}, w_{Uij}, w_{\Delta Uij}, s_{Yj}, s_{Uj}, s_{\Delta Uj}$ các trọng số và hệ số tỉ lệ tương ứng với biến đầu ra, biến điều khiển, lượng gia tăng điều khiển. Điều kiện ràng buộc liên quan đến lực và mô men điều khiển:

$$\begin{cases} F_{\min} \leq U_{1(k+i|k)} \leq F_{\max}, i = \overline{1, N} \\ T_{\min} \leq U_{2(k+i|k)} \leq T_{\max}, i = \overline{1, N} \end{cases} \quad (14)$$

Bài toán tối ưu trong NMPC tương đương với việc tìm bộ nghiệm $\mathbf{Z}_k$ để giá trị J đạt cực tiểu với điều kiện (14). Đặt hàm Lagrange:

$$L([\mathbf{Z}_k^T, \lambda^T, \gamma^T]^T) = J(\mathbf{Z}_k) + \lambda^T \mathbf{g}(\mathbf{Z}_k) + \gamma^T \mathbf{h}(\mathbf{Z}_k). \text{ Trong đó:}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{Z}_k) = [F_{\min} - U_{1(k+1|k)} \quad \dots \quad F_{\min} - U_{1(k+N|k)} \quad F_{\min} - U_{2(k+1|k)} \quad \dots \quad F_{\min} - U_{2(k+N|k)}]^T;$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{Z}_k) = [U_{1(k+1|k)} - F_{\max} \quad \dots \quad U_{1(k+N|k)} - F_{\max} \quad U_{2(k+1|k)} - F_{\max} \quad \dots \quad U_{2(k+N|k)} - F_{\max}]^T$$

Giải hệ phương trình (15), ta tìm được nghiệm tối ưu cho bộ điều khiển NMPC:

$$\begin{cases} \nabla L(\mathbf{Z}_k, \lambda, \gamma) = 0; \\ \lambda \geq 0 \\ \gamma \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

Ở đây, $\lambda \geq 0$ nếu $\lambda_i \geq 0, \forall i = \overline{1, N}$. Sau khi tìm được chuỗi điều khiển tối ưu $\mathbf{Z}_k^* = \{\mathbf{U}_{k+1|k}^*, \mathbf{U}_{k+2|k}^*, \dots, \mathbf{U}_{k+N|k}^*\}$, lực điều khiển tiếp theo tại thời điểm $t + 1$ sẽ là $\mathbf{U}_{k+1} = \mathbf{U}_{k+1|k}^*$.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để mô phỏng, ta sử dụng mô hình Cybership II [2]. Với vận tốc chuyển động nhỏ, đối tượng điều khiển ASV có thể được tuyến tính hóa với các ma trận trong mô hình động lực:

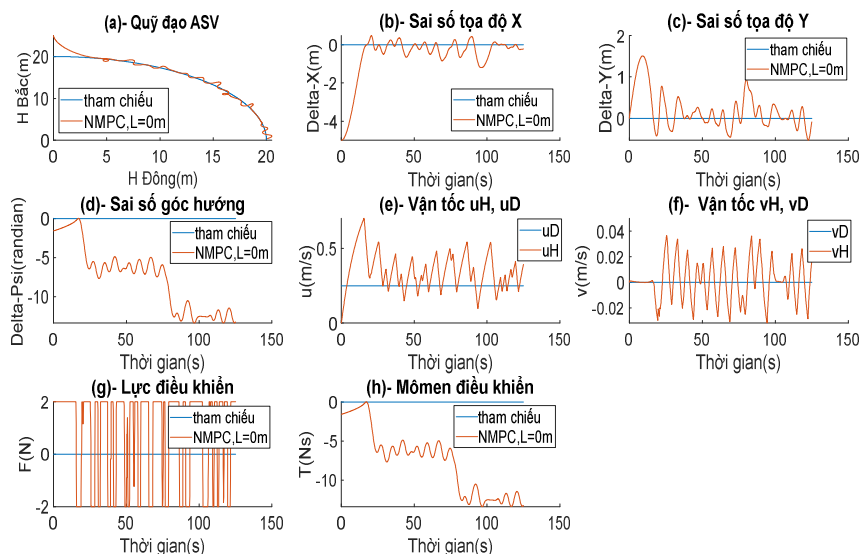
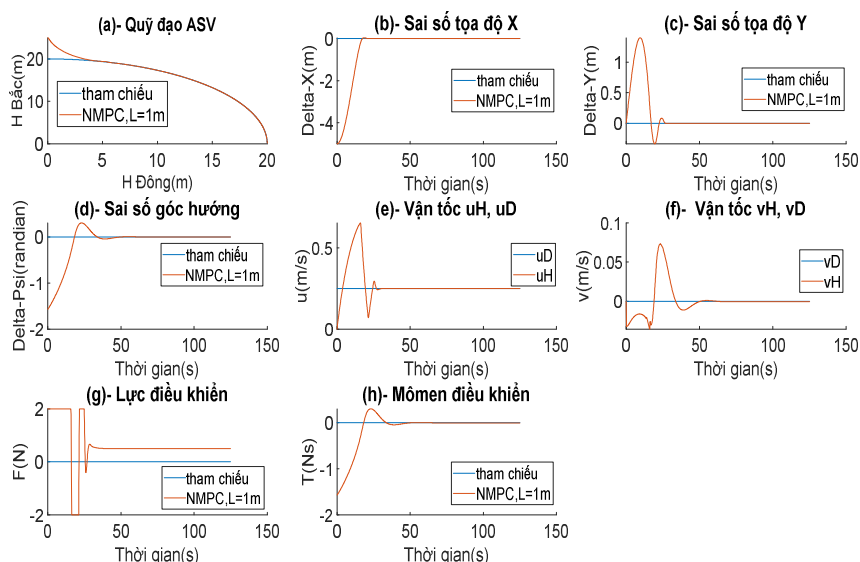
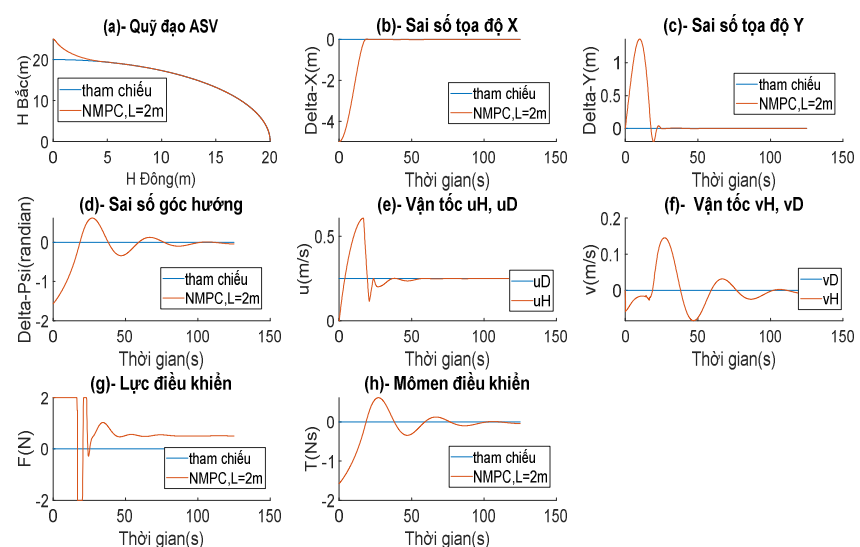
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 25,8 & 0 & 0 \\ 0 & 33,8 & 1,0115 \\ 0 & 1,0115 & 2,76 \end{bmatrix}; \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0,1 \\ 0 & 0,1 & 0,5 \end{bmatrix}$$

Lực đẩy và mô men bị giới hạn trong dải: $-2N \leq F \leq 2N$, $-1,5Nm \leq T \leq 1,5Nm$. Quỹ đạo thử nghiệm là một phần tư cung tròn bán kính 20m, mô tả bởi hàm tham số:

$$\begin{cases} x = 20 \cos(\gamma) \\ y = 20 \sin(\gamma) \end{cases}, \gamma \in [0, \pi/2]. \text{ Tại vị trí xuất phát,}$$

$\mathbf{P}_0 = (25, 0)$, $\psi_0 = \pi$, $\mathbf{v}_0 = (0, 0)$, $r_0 = 0$. Vận tốc mong muốn $u_d = \|\mathbf{v}_d\| = 0,25 \text{ m/s}$. Thử nghiệm được tiến hành với bộ điều khiển NMPC thiết kế trong mục 2.3 để điều khiển phương tiện nổi tự hành (CybershipII) di chuyển bám quỹ đạo. Luật dẫn được xác định bởi (9), các tham số L được chọn lần lượt là: $L = 0 \text{ m}$, $L = 1 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$, $L = 3 \text{ m}$, $L = 4 \text{ m}$. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 3, 4, 5, 6, 7.

Hình 3 minh họa kết quả mô phỏng với bộ điều khiển NMPC, được thực hiện khi chưa thay đổi vị trí điểm điều khiển ($L = 0 \text{ m}$). Nhìn tổng thể, ASV vẫn di chuyển theo quỹ đạo, tuy nhiên nó không bám, điều này thể hiện ở các sai số tọa độ và sai số góc hướng lớn, dao động liên tục, vận tốc ASV không đạt được giá trị đặt. Trong trường hợp này lực và mô men điều khiển thay đổi liên tục, điều này là nên tránh khi thiết kế bộ điều khiển bởi vì nó ảnh hưởng đến độ bền của cơ cấu chấp hành.

Hình 3. Điều khiển ASV với bộ điều khiển NMPC, $L = 0m$ Hình 4. Điều khiển ASV với bộ điều khiển NMPC, $L = 1m$ Hình 5. Điều khiển ASV với bộ điều khiển NMPC, $L = 2m$

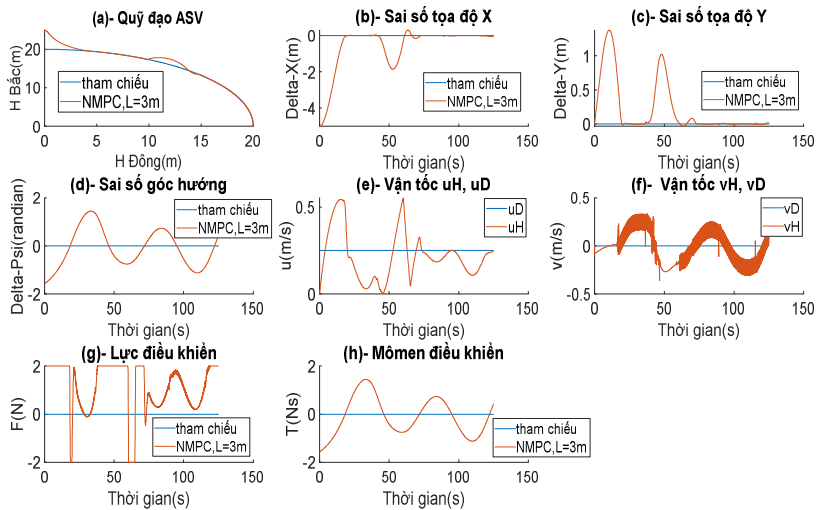
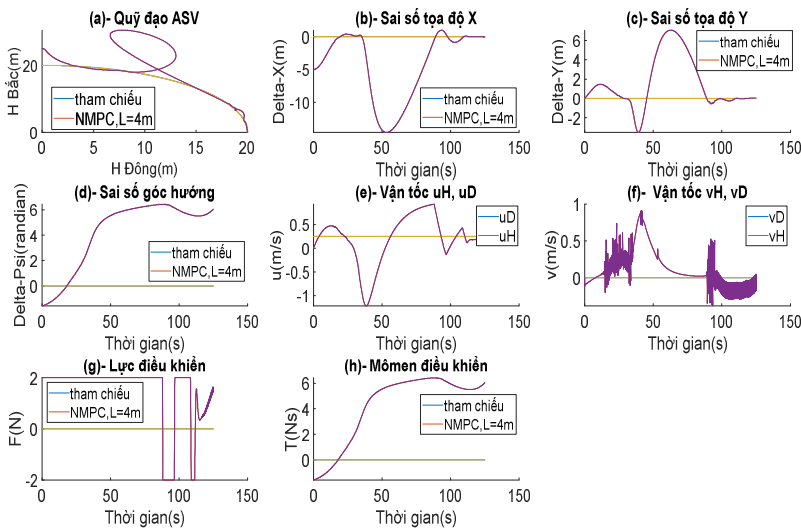
Hình 4 cho kết quả điều khiển tốt nhất với bộ điều khiển NMPC và với $L = 1m$. Trên hình 4(a) ASV hội tụ mượt và di chuyển bám sát quỹ đạo, các sai lệch tọa độ theo trục H Bắc và H Đông hội tụ tới 0, hướng của ASV bám sát tiếp tuyến quỹ đạo tại vị trí tham chiếu. Vận tốc của ASV bám sát giá trị đặt (0,25m/s). Các tham số điều khiển lực (F) và mô men (T) được tối ưu, nằm trong ngưỡng giới hạn và ít giao động theo thời gian. ASV tiếp tục hội tụ đến quỹ đạo mong muốn với $L = 2m$ (hình 5), tuy nhiên, trong trường hợp này có thể thấy có sự dao động về góc hướng và vận tốc bám. Với $L = 3m$, ASV bắt đầu cho thấy sự mất ổn định về hướng, vận tốc bám và điều khiển, tuy nhiên, về cơ bản ASV vẫn bám theo quỹ đạo mong muốn với sai lệch tọa độ tăng lên (hình 6). Trong trường hợp $L = 5m$, bộ điều khiển ASV không đáp ứng được, ASV bắt đầu mất bám quỹ đạo (hình 7).

Như vậy với bộ điều khiển NMPC thiết kế trong 2.3, kết hợp với luật dẫn thiết kế trong 2.2 và kỹ thuật thay đổi điểm điều khiển trong 2.1, nhóm tác giả đã giải quyết được bài toán điều khiển phương tiện nổi hệt dẫn động di chuyển bám quỹ đạo trong điều kiện lực điều khiển bị ràng buộc.

Mặc dù giải pháp cho thấy hiệu quả trong bài toán điều khiển ASV hệt dẫn động bám quỹ đạo, để đơn giản khi tính toán trong mô phỏng, nhóm tác giả chưa đưa mô hình nhiễu vào phương trình động lực. Để có thể đánh giá một cách toàn diện ảnh hưởng của nhiễu trong phương pháp đề xuất, nhóm tác giả sẽ trình bày trong công trình tiếp theo.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp điều khiển phương tiện nổi hệt dẫn động di chuyển bám quỹ đạo. Bằng cách thay đổi vị trí điểm điều khiển, bài báo đã khắc phục được vấn đề hệt dẫn động. Bộ điều khiển thiết kế dựa trên kỹ thuật NMPC giải quyết tính phi tuyến của mô hình động lực và cho phép tối ưu lực điều khiển, có tính đến các ràng buộc đầu vào điều khiển. Kết quả mô phỏng với mô

Hình 6. Điều khiển ASV với bộ điều khiển NMPC, $L = 3\text{m}$ Hình 7. Điều khiển ASV với bộ điều khiển NMPC, $L = 4\text{m}$

hình Cybership II cho thấy, với phương pháp đề xuất, phương tiện ASV hút dẫn động di chuyển bám quỹ đạo với khoảng cách tối ưu $L = 1\text{m}$ từ điểm điều khiển mới H đến điểm trọng tâm G. Kết quả này tốt hơn nhiều so với trường hợp không thay đổi điểm điều khiển ($L = 0\text{m}$). Trong công trình tiếp theo, nhóm tác giả sẽ đi sâu hơn vào phân tích ảnh hưởng của nhiều tác động lên giải pháp đề xuất, cũng như so sánh nó với một số kỹ thuật điều khiển khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. AUVAC, *Autonomous Undersea Vehicles Applications Center*, 2023. Available: <https://auvac.org/>
- [2]. Fossen T. I., *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, pp. 254-278, 2011.
- [3]. H.T.T. Uyên, *Nghiên cứu ứng dụng lý thuyết điều khiển thích nghi để nâng cao chất lượng hệ thống lái tự động tàu nổi có chỏn nước*. Luận án tiến sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2018.

[4]. C. Lee, Q. V. Tran, and J. Kim, 2022. *Robust path tracking and obstacle avoidance using tube-based model predictive control for surface vehicles*, IFAC-Papers OnLine, vol. 55, no. 31, pp. 301–306

[5]. Fossen TI, Breivik M, Skjetne R, "Line-of-sight path following of underactuated marine craft," *IFAC Proc.*, 36, 211-216, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37809-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37809-6).

[6]. Shojaei K, Dolatshahi M, "Line-of-sight target tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles," *Ocean Eng.*, 133, 244-252, 2017.

[7]. Jiang Y, Peng Z, Wang D, Chen CLP, "Line-of-sight target enclosing of an underactuated autonomous surface vehicle with experiment results," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 16, 832-841, 2020.

[8]. Yamasaki T, Enomoto K, Takano H, Baba Y, Balakrishnan SN, "Advanced pure pursuit guidance via sliding mode approach for chase UAV," *AIAA Guid. Navig. Control Conf. Exhib.*, 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-6298>

[9]. Lim S, Jung W, Bang H, "Vector field guidance for path following and arrival angle control," in *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Proceedings. IEEE*, 329-338, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842271>

[10]. Xu H, Guedes Soares C, "An optimized energy-efficient path following algorithm for underactuated marine surface ship model," *Int. J. Marit. Eng.*, 160, A-411-A-421, 2018.

[11]. Lipko I., "PID Based Path Follower for the MiddleAUV on the Test Polygon," in *International Russian Automation Conference*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.

[12]. O.H. Dagci, U.Y. Ogras, U. Ozguner, "Path following controller design using sliding mode control theory," in *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 1, 903-908, 2003.

[13]. Su Y., Wan L., Zhang D., Huang F., "An improved adaptive integral line-of-sight guidance law for unmanned surface vehicles with uncertainties," *Appl. Ocean Res.*, 108, 2021, Art. no. 102488, 2021.

[14]. Miao J, Wang S, Tomovic MM, Zhao Z, "Compound line-of-sight nonlinear path following control of underactuated marine vehicles exposed to wind, waves, and ocean currents," *Nonlinear Dyn.*, 89, 2441-2459, 2017. <https://doi.org/10.1007/S11071-017-3596-9/FIGURES/11>

AUTHORS INFORMATION

Cao Duc Sang¹, Tran Van Quoc², Le Tran Thang¹,
Nguyen Trong Khuyen¹

¹Control, Automation in Production and Improvement of Technology Institute, Vietnam

²School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam