

NGHIÊN CỨU TỰ ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN TÀU THỦY CẬP CẦU DỰA TRÊN BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT SỬA LỖI THÍCH NGHI KHI CÓ CƠ CẤU CHẤP HÀNH BỊ LỖI

A STUDY ON AN AUTOMATIC SHIP BERTHING USING ADAPTIVE FAULT-TOLERANT SLIDING MODE CONTROLLER WITH ACTUATORS FAULTS

VŨ SƠN TÙNG, NGUYỄN THÁI DƯƠNG, NGUYỄN VĂN SƯỞNG*

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Bài báo giải quyết bài toán tự động điều khiển cập cầu cho tàu thủy khi cơ cấu chấp hành bị lỗi và nhiễu ngoại cảnh tác động. Điều khiển trượt được sử dụng làm bộ điều khiển lõi để đảm bảo tính ổn định cho bộ điều khiển tự động tàu cập cầu. Hai tín hiệu hiệu chỉnh được thiết kế trong tín hiệu điều khiển để giải quyết ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và ảnh hưởng khi cơ cấu chấp hành của tàu xảy ra lỗi. Hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất được minh chứng thông qua các kết quả mô phỏng.

Từ khóa: Tự động điều khiển tàu cập cầu, điều khiển sửa lỗi, lỗi cơ cấu chấp hành.

Abstract

This paper addresses the problem of automatic ship berthing subject to actuator faults and external disturbances. Sliding mode control is used as a core controller, providing robust features for the auto-berthing control system. Two adaptive reaching signals are designed in control signal to compensate the effect of external disturbance and effect of actuator faults. The effectiveness of proposed controller is proved by numerical simulations.

Keywords: Automatic ship berthing, fault-tolerant controller, actuator faults.

1. Mở đầu

Hiện nay, điều khiển sửa lỗi đang được nhiều nhà khoa học tập trung nghiên cứu phát triển để nâng cao mức độ an toàn của hệ thống điều khiển tự động. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để giải quyết vấn đề điều khiển sửa lỗi trong các lĩnh vực khác nhau như: Điều khiển cánh tay robot [1], ngành hàng không [2], điều khiển vệ tinh [3], điều khiển các phương tiện hàng hải [4] và các hệ thống khác [5]. Trong ngành kỹ thuật hàng hải, hiện nay chỉ có một số công trình nghiên cứu điều

kiển sửa lỗi cho tàu thủy bám quỹ đạo được thực hiện [6] [7] [8]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu về điều khiển sửa lỗi cho quá trình tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy được thực hiện. Trong thực tế, tự động điều khiển tàu cập cầu là nhiệm vụ khó khăn phức tạp hơn điều khiển tàu bám quỹ đạo đơn thuần. So với khi hàng hải ngoài khơi, ngoài yêu cầu đảm bảo bám quỹ đạo cập cầu dự kiến, tàu thủy cần giảm dần tốc độ để tiếp cận cầu cảng an toàn. Khi đó, tàu thủy sẽ chịu ảnh hưởng lớn của các yếu tố ngoại cảnh như sóng gió, dòng chảy, hiệu ứng đệm bờ, hiện tượng squat. Khi cơ cấu chấp hành của tàu bị lỗi, tàu có thể bị mất điều khiển, gây va chạm với cầu tàu, tàu khác hoặc các chướng ngại vật. Do đó, nghiên cứu điều khiển sửa lỗi trong tự động điều khiển tàu cập cầu là một vấn đề cần được nghiên cứu giải quyết để nâng cao an toàn trong quá trình phát triển tàu tự hành trong tương lai.

Trong thực tế, lỗi xảy ra trong hệ thống điều khiển tự động bao gồm: Lỗi cơ cấu chấp hành, lỗi cảm biến, và lỗi trong hệ thống. Hầu hết các nghiên cứu điều khiển sửa lỗi cho các phương tiện hàng hải tập trung vào lỗi cơ cấu chấp hành với 2 giải pháp chính: Phản phối điều khiển và điều khiển thích nghi. Với giải pháp đầu tiên, một ma trận trọng khối chân vịt được đề xuất trong bộ điều khiển [9] và có thể được điều chỉnh theo tỉ lệ lỗi hiệu suất của chân vịt. Giải pháp điều khiển thích nghi trong điều khiển sửa lỗi dựa trên một bộ ước lượng lỗi. Nghiên cứu [7] và [8] đề xuất điều khiển sửa lỗi cho nhiều loại lỗi khác nhau của chân vịt và điều khiển trượt thích nghi sử dụng bộ trễ thời gian. Lỗi cơ cấu chấp hành có thể xảy ra lỗi toàn phần hoặc lỗi một phần. Lỗi toàn phần xảy ra với cơ cấu chấp hành là khi cơ cấu chấp hành bị kẹt không thể tạo ra lực đẩy mặc dù có tín hiệu điều khiển. Lỗi một phần của cơ cấu chấp hành là khi lực đẩy tạo ra bị suy giảm so với lực đẩy theo yêu cầu, thường được thể hiện dưới dạng phần trăm.

Bài báo đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và lỗi một phần của cơ cấu chấp hành.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Yêu cầu của bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và lỗi một phần của cơ cấu chấp hành

Bộ điều khiển tự động tàu cập cầu cho tàu thủy cần đáp ứng được các yêu cầu sau:

- Đảm bảo điều khiển tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời điều khiển hướng mũi tàu theo hướng cập cầu;
- Giảm dần tốc độ tàu, đảm bảo tốc độ bằng không tại vị trí cầu tàu;
- Đảm bảo duy trì chất lượng điều khiển dưới ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh;
- Đảm bảo duy trì chất lượng điều khiển khi xảy ra lỗi một phần của cơ cấu chấp hành.

2.2. Mô hình toán chuyển động tàu thủy

Để giải quyết cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu, mô hình toán chuyển động của tàu theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang được sử dụng bao gồm 3 chuyển động: Chuyển động theo trục dọc tàu (Surge); chuyển động dịch chuyển ngang (Sway) và chuyển động xoay (Yaw). Mô hình toán chuyển động theo 3 bậc tự do trên mặt phẳng ngang cho tàu thủy được trình bày trong tài liệu [10]:

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

Trong đó: $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ là véc-tơ thể hiện vị trí tàu (x, y) và hướng mũi tàu ψ ; $v = [u \ v \ r]^T$ là véc-tơ tốc độ tiến lùi, tốc độ dạt ngang, tốc độ quay trong hệ tọa độ tàu; M là ma trận quán tính; $C(v)$ là ma trận Coriolis và hướng tâm; $D(v)$ là ma trận giảm chấn thủy động lực học; τ là véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu theo 3 trục chuyển động: chuyển động theo trục dọc tàu (Surge), chuyển động dịch chuyển ngang (Sway) và chuyển động xoay (Yaw); d là véc-tơ lực và mômen do nhiễu ngoại cảnh tác động.

Ma trận chuyển đổi $J(\eta)$:

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

Ma trận quán tính M :

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó: m_{11} , m_{22} , và m_{33} là hệ số quán tính bao gồm ảnh hưởng tăng khối lượng (có giá trị dương

không đổi).

Ma trận Coriolis và hướng tâm $C(v)$:

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận giảm chấn thủy động lực học $D(v)$:

$$D(v) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó: d_{11} , d_{22} , và d_{33} là hệ số giảm chấn thủy động lực học.

Giả định 1: Ma trận quán tính là ma trận xác định dương không đổi hoặc thay đổi chậm.

Mô hình (1) được nghiên cứu sử dụng để thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và lỗi một phần của cơ cấu chấp hành.

2.3. Mô hình lỗi cơ cấu chấp hành

Véc-tơ lực và mômen điều khiển gây ra bởi các cơ cấu chấp hành của tàu τ có thể được xác định bởi công thức sau:

$$\tau = Hu_c \quad (6)$$

Trong đó: $u_c = [u_{c1} \ u_{c2} \ u_{c3}]^T$ là tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển theo 3 trục chuyển động; H là ma trận hệ số sức khỏe của cơ cấu chấp hành:

$$H(t) = \text{diag}[h_1(t) \ h_2(t) \ h_3(t)] \quad (7)$$

với $0 < h_i(t) \leq 1, i = 1, 2, 3$

Giả định 2: Do lỗi một phần cơ cấu chấp hành xảy ra vào thời điểm không xác định, hệ số sức khỏe H không thay đổi sau khi lỗi một phần cơ cấu chấp hành xảy ra. Giả định rằng $\dot{H}(t) = 0$ và hệ số $(I-H)$ đại diện cho phần suy giảm hiệu năng của cơ cấu chấp hành.

Giả định 3: Nhiễu ngoại cảnh tác động d và hệ số suy giảm hiệu năng của cơ cấu chấp hành $(I-H)$ bị giới hạn và thỏa mãn:

$$\begin{cases} \|d\| < d_b \\ \|I - H\| < H_b < 1 \end{cases} \quad (8)$$

3. Thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và lỗi một phần của cơ cấu chấp hành

3.1. Thiết kế tốc độ mong muốn ảo

Trước tiên, các tốc độ mong muốn ảo của tàu (u_d , v_d , và r_d) được thiết kế từ vị trí và hướng tàu mong

muốn (x_d, y_d, ψ_d) của quỹ đạo cập cầu dự kiến. Các tốc độ mong muốn ảo của tàu bằng không khi tàu tại vị trí cầu tàu.

Sai số bám vị trí và hướng tàu được xác định như sau:

$$e_\eta = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

Đạo hàm sai số bám vị trí và hướng tàu theo thời gian:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\psi}_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sai số bám tốc độ được xác định như sau:

$$e_v = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} = v - v_d \quad (11)$$

Từ công thức (1), véc-tơ tốc độ tàu v có công thức sau:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Trong đó:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Véc-tơ tốc độ mong muốn ảo của tàu tới bộ điều khiển được thiết kế như sau:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \tanh(k_x e_x) \\ \dot{y}_d - \tanh(k_y e_y) \\ \dot{\psi}_d - \tanh(k_\psi e_\psi) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Trong đó: $k_x, k_y, k_\psi > 0$ là hệ số khuếch đại điều khiển.

Định lý 1: Nếu sai số bám tốc độ (e_u, e_v, e_r) trong công thức (11) hội tụ về không, sai số bám vị trí và hướng tàu (e_x, e_y, e_ψ) trong công thức (9) sẽ được đảm bảo hội tụ về không.

Chứng minh: Thay công thức (12), (13) và (14) vào công thức (11), ta được:

$$e_v = R(\psi) \begin{bmatrix} \dot{e}_x + \tanh(k_x e_x) \\ \dot{e}_y + \tanh(k_y e_y) \\ \dot{e}_\psi + \tanh(k_\psi e_\psi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Do $|R(\psi)| = 1$, ma trận quán tính $R(\psi)$ là ma trận không suy biến. Do đó, nếu sai số bám tốc độ (e_u, e_v, e_r) trong công thức (7) hội tụ về không, thành phần $(\dot{e}_x + \tanh(k_x e_x))$, $(\dot{e}_y + \tanh(k_y e_y))$, và $(\dot{e}_\psi +$

$\tanh(k_\psi e_\psi))$ sẽ hội tụ về không hay:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -\tanh(k_x e_x) \\ \dot{e}_y = -\tanh(k_y e_y) \\ \dot{e}_\psi = -\tanh(k_\psi e_\psi) \end{cases} \quad (16)$$

Chọn hàm Lyapunov V như sau:

$$V = \frac{1}{2} e_x^2 + \frac{1}{2} e_y^2 + \frac{1}{2} e_\psi^2 \quad (17)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov V :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y + e_\psi \dot{e}_\psi \\ &= -e_x \tanh(k_x e_x) - e_y \tanh(k_y e_y) \\ &\quad - e_\psi \tanh(k_\psi e_\psi) \end{aligned} \quad (18)$$

Với $k_x, k_y, k_\psi > 0$, $\dot{V} < 0$. Do đó, V sẽ hội tụ về 0 và sai số bám vị trí và hướng mũi tàu e_x, e_y, e_ψ cũng đồng thời hội tụ về 0. **Định lý 1** đã được chứng minh.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi

Theo **Định lý 1**, nếu tốc độ tàu được điều khiển bám theo tốc độ mong muốn ảo trong công thức (14), sai số bám vị trí và hướng tàu (e_x, e_y, e_ψ) trong công thức (6) sẽ được đảm bảo hội tụ về không hay tàu sẽ bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến. Trong phần này, tín hiệu điều khiển trượt theo tốc độ mong muốn ảo sẽ được thiết kế. Trong tín hiệu điều khiển, hai tín hiệu hiệu chỉnh được thiết kế để giải quyết ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và ảnh hưởng khi cơ cấu chấp hành của tàu xảy ra lỗi một phần.

Chọn mặt trượt như sau:

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = e_v \quad (19)$$

Từ công thức (1), ta có:

$$\dot{v} = M^{-1}(-C(v)v - D(v)v + \tau + d) \quad (20)$$

Thay công thức (12) và (20) vào công thức (19):

$$\dot{s} = M^{-1}(-C(v)v - D(v)v + \tau + d) - \dot{v}_d \quad (21)$$

Thay công thức lỗi cơ cấu chấp hành (6) vào công thức (21):

$$\dot{s} = M^{-1}(-C(v)v - D(v)v + Hu_c + \quad (22)$$

$$d) - \dot{v}_d$$

$$= M^{-1}[-C(v)v - D(v)v - M\dot{v}_d +$$

$$Hu_c + d]$$

Tín hiệu điều khiển được thiết kế như sau:

$$u_c = u_n + u_{r1} + u_{r2} \quad (23)$$

Trong đó: u_n là tín hiệu tương đương với $A = C(v)v + D(v)v + M\dot{v}_d$; u_{r1} là tín hiệu hiệu chỉnh thứ nhất để giải quyết ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động; u_{r2} tín hiệu hiệu chỉnh thứ hai để giải quyết ảnh hưởng của lỗi một phần của cơ cấu chấp hành:

$$u_n = Cv + Dv + M\dot{v}_d = A \quad (24)$$

$$u_{r1} = -k \operatorname{sign}(s) \quad (25)$$

$$u_{r2} = -\lambda |A| \operatorname{sign}(s) \quad (26)$$

Luật điều khiển thích nghi được thiết kế như sau:

$$\dot{k} = a_k |s| \quad (27)$$

$$\dot{\lambda} = a_\lambda |A| |s| \quad (28)$$

Trong đó: γ là tham số dương, a_k và a_λ là tốc độ thích nghi. $k > 0$ và $\lambda \geq 0$ là hệ số thích nghi.

3.3. Phân tích ổn định của hệ thống

Từ công thức (22), (23), (24) và (25), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= M^{-1}[-A + H(A - k \operatorname{sign}(s) - \lambda |A| \operatorname{sign}(s)) + d] \\ &= M^{-1}[(H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sign}(s) - Hk \operatorname{sign}(s) + d] \end{aligned} \quad (29)$$

Xét các tham số giới hạn sau:

$$\begin{cases} k_b = d_b / (1 - H_b) \\ \lambda_b = H_b / (1 - H_b) \end{cases} \quad (30)$$

Xét sai số tham số sau:

$$\begin{cases} \tilde{k} = k_b - k \\ \tilde{\lambda} = \lambda_b - \lambda \end{cases} \quad (31)$$

Chọn hàm Lyapunov L như sau:

$$L = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2a_k} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{k}^T \tilde{k} + \frac{1}{2a_\lambda} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{\lambda}^T \tilde{\lambda} \quad (32)$$

Đạo hàm hàm Lyapunov L :

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} - \frac{1}{a_k} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{k}^T \dot{\tilde{k}} - \frac{1}{a_\lambda} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{\lambda}^T \dot{\tilde{\lambda}} \\ &= s M^{-1} [(H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sign}(s) - Hk \operatorname{sign}(s) + d] - \frac{1}{a_k} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{k}^T \dot{\tilde{k}} - \frac{1}{a_\lambda} (1 - H_b) M^{-1} \tilde{\lambda}^T \dot{\tilde{\lambda}} \end{aligned} \quad (33)$$

Với luật thích nghi (27), (28), đạo hàm hàm Lyapunov L được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s M^{-1} [(H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sign}(s) - Hk \operatorname{sign}(s) + d] - (1 - H_b) M^{-1} (k_b - k) |s| - (1 - H_b) M^{-1} (\lambda_b - \lambda) |A| |s| \\ &= s M^{-1} [(H - 1)A - H\lambda |A| \operatorname{sign}(s) - Hk \operatorname{sign}(s) + d] - (1 - H_b) M^{-1} \left(\frac{d_b}{1 - H_b} - k \right) |s| - (1 - H_b) M^{-1} \left(\frac{H_b}{1 - H_b} - \lambda \right) |A| |s| \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} &= M^{-1} [(H - 1)As - H_b |A| |s|] + M^{-1} [-H\lambda |A| |s| + (1 - H_b) \lambda |A| |s|] + M^{-1} [-Hk |s| + (1 - H_b) k |s|] + M^{-1} [ds - d_b |s|] \end{aligned}$$

Từ Giả định 3, ta có:

$$\begin{aligned} (H - 1)As &< H_b |A| |s| \\ (1 - H_b) \lambda |A| |s| &< H\lambda |A| |s| \\ (1 - H_b) k |s| &< Hk |s| \\ ds &< d_b |s| \end{aligned} \quad (35)$$

Từ công thức (34) và (35), $\dot{L} < 0$. Hệ thống ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

4. Kết quả mô phỏng

Nhằm đánh giá chất lượng điều khiển của bộ điều khiển được đề xuất, tác giả sử dụng mô hình tàu Cyber Ship II, là bản sao tỉ lệ 1:70 của một tàu dịch vụ được phát triển bởi viện Marine Cybernetics. Đây là tàu đủ cơ cấu chấp hành với 2 chân vịt và 2 bánh lái, và 1 chân vịt mũi. Thông số động học chi tiết của mô hình tàu Cyber ship II được tham khảo trong tài liệu [11] và được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số động học của tàu Cyber Ship II

Tham số	Giá trị	Đơn vị
m	23.8	kg
L	1.235	m
B	0.29	m
m_{11}	25.8	kg
m_{22}	33.8	kg
m_{33}	2.76	kgm ²
d_{11}	7.92	kg/s
d_{22}	38.23	kg/s
d_{33}	2.73	kgm ² /s

Vị trí, hướng và tốc độ ban đầu của tàu: $x(0) = 0m$, $y(0) = 0m$, $\psi(0) = \pi/6$, $u(0) = 0m/s$, $v(0) = 0m/s$, $r(0) = 0m/s$. Vị trí và hướng cập cầu: $x(b) = 20m$, $y(b) = 20m$, $\psi(b) = 0$.

Quỹ đạo cập cầu được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} x = x(b) * (2t - t^2) / T^2 \\ y = y(b) (3t - 3t^2 - t^3) / T^3 \end{cases} \quad (36)$$

T là thời gian dự kiến cập cầu.

Hệ số của bộ điều khiển được chọn như sau: $k_x = 1$, $k_y = 1$, $k_\psi = 0.8$, hệ số khuếch đại ban đầu $k = [1 \ 1 \ 1]$ và $\lambda = [0 \ 0 \ 0]$, tốc độ thích nghi $a_k = 0.5$, $a_\lambda = 0.2$.

Nhiều ngoại cảnh tác động d theo tài liệu [12]:

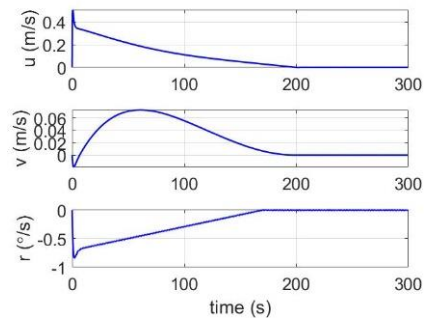
$$d = \begin{bmatrix} 0.2 + 0.001 \cdot \cos(0.8 * \pi * t) \\ 0.4 + 0.001 \cdot \sin(0.8 * \pi * t) \\ 0.2 + 0.001 \cdot \cos(0.8 * \pi * t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

4.1. Mô phỏng khi không có lỗi cơ cấu chấp hành

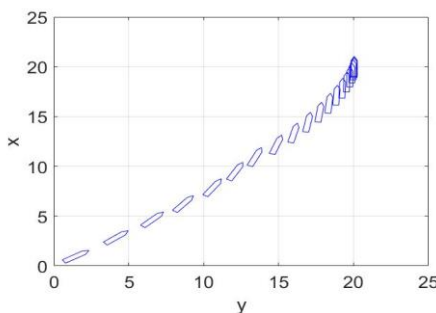
Với mô phỏng khi không có lỗi cơ cấu chấp hành, hệ số sức khô của cơ cấu chấp hành $H=1$.

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 1-7. Tàu được điều khiển hoàn thành công việc cập cầu vào lúc 200s. Hướng mũi tàu được quay từ $\pi/6$ tới 0 khoảng 150s, và giữ ở 0 mặc dù có hiện tượng rung do ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động. Tốc độ tiến lùi u của tàu tăng đến 0,5m/s sau đó giảm dần về 0 tại 200s. Tốc độ dạt ngang v tăng đến 0,07m/s khoảng 70s sau đó giảm dần về 0 tại 170s. Từ Hình 6

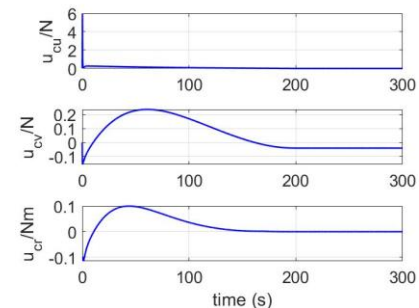
và 7, hệ số thích nghi tăng dần để giải quyết ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động.



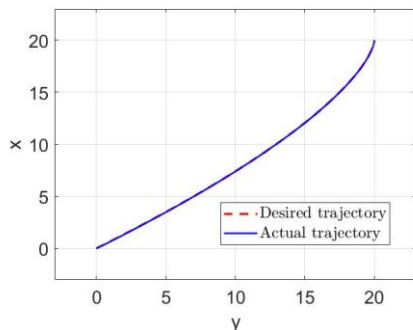
Hình 4. Đồ thị tốc độ của tàu khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



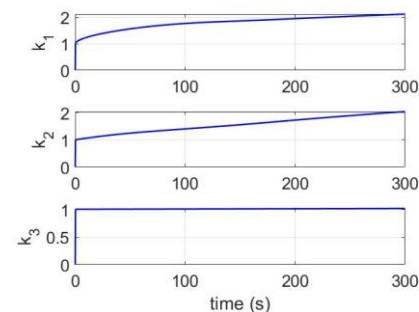
Hình 1. Quỹ đạo cập cầu của tàu khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



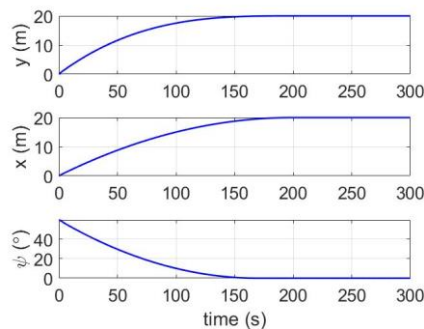
Hình 5. Đồ thị tín hiệu điều khiển khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



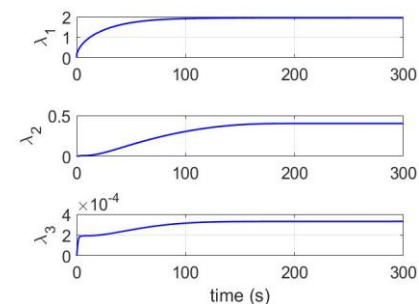
Hình 2. Đồ thị bám quỹ đạo cập cầu của tàu khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 6. Hệ số thích nghi k khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 3. Đồ thị vị trí và hướng mũi của tàu khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 7. Hệ số thích nghi λ khi không có lỗi cơ cấu chấp hành

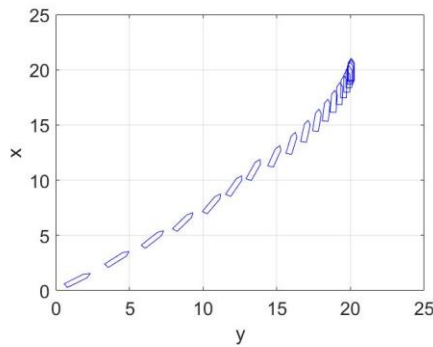
4.2. Mô phỏng khi có lỗi cơ cấu chấp hành

Giả sử các cơ cấu chấp hành có lỗi một phần như sau:

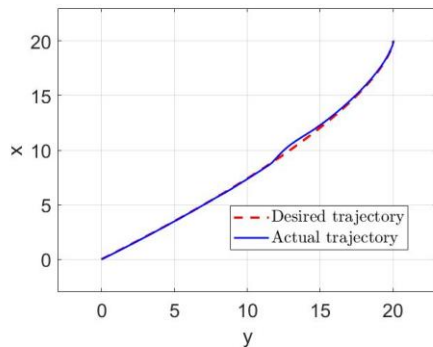
$$h_1 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 30s \\ 0.4 & \text{khi } t \geq 30s \end{cases} \quad (38)$$

$$h_2 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 50s \\ 0.3 & \text{khi } t \geq 50s \end{cases} \quad (39)$$

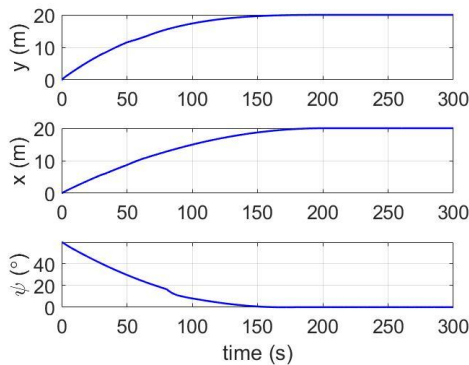
$$h_3 = \begin{cases} 1 & \text{khi } t < 80s \\ 0.2 & \text{khi } t \geq 80s \end{cases} \quad (40)$$



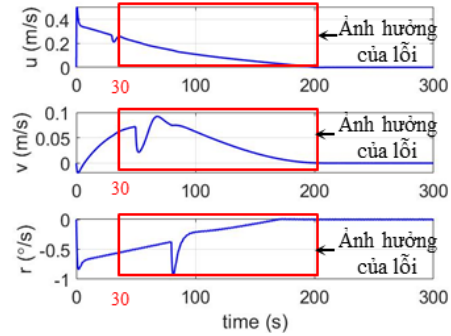
Hình 8. Đồ thị bám quỹ đạo cập cầu dự kiến của tàu khi không có lỗi cơ cấu chấp hành



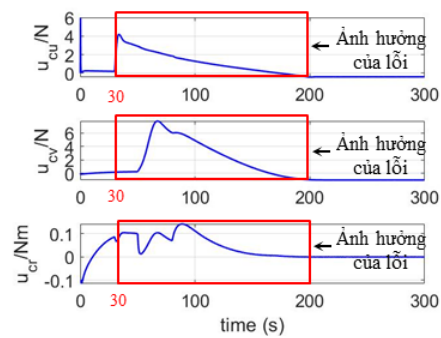
Hình 9. Đồ thị bám quỹ đạo cập của tàu khi có lỗi cơ cấu chấp hành



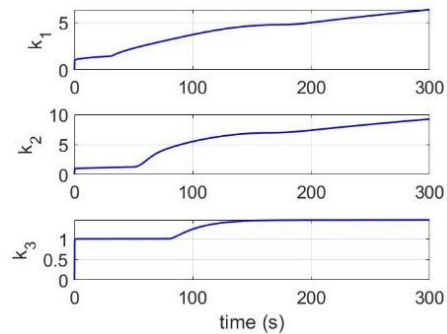
Hình 10. Đồ thị vị trí và hướng mũi của tàu khi có lỗi cơ cấu chấp hành



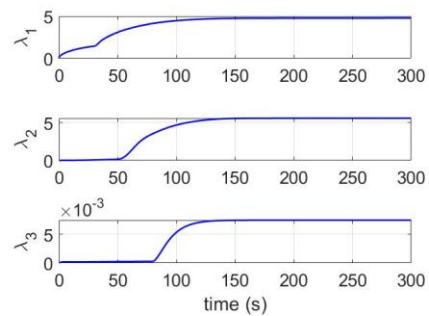
Hình 11. Đồ thị tốc độ của tàu khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 12. Đồ thị tín hiệu điều khiển khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 13. Hệ số thích nghi k khi có lỗi cơ cấu chấp hành



Hình 14. Hệ số thích nghi λ khi có lỗi cơ cấu chấp hành

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 8-14. Tàu được điều khiển hoàn thành công việc cập cầu vào lúc 200s mặc dù có lỗi một phần của các cơ cấu chấp hành trong quá trình điều khiển. Từ Hình 11 và 12, do ảnh hưởng của lỗi một phần cơ cấu chấp hành từ 30s tín hiệu điều khiển được khuếch đại nhờ hệ số thích nghi để đảm bảo bám quỹ đạo cập cầu dự kiến đồng thời giảm dần tốc độ về 0 tại vị trí cầu. Các hệ số thích nghi được khuếch đại để giải quyết ảnh hưởng đồng thời của nhiễu ngoại cảnh tác động và lỗi một phần của cơ cấu chấp hành.

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã đề xuất một bộ điều khiển trượt sửa lỗi thích nghi cho bài toán tự động điều khiển tàu cập cầu cho tàu thủy khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và khi có lỗi một phần cơ cấu chấp hành. Phương pháp điều khiển trượt theo tín hiệu tốc độ mong muốn ảo đảm bảo tàu bám theo quỹ đạo cập cầu dự kiến, đồng thời đảm bảo tốc độ tàu bằng 0 tại vị trí cầu tàu. Tín hiệu điều khiển thích nghi được sử dụng để giải quyết ảnh hưởng của nhiễu ngoại cảnh tác động và ảnh hưởng khi cơ cấu chấp hành lỗi một phần. Các kết quả mô phỏng chứng minh hiệu quả và tính ổn định của bộ điều khiển được đề xuất.

Ngoài ra, bộ điều khiển này là một bộ điều khiển sửa lỗi thụ động không cần bộ nhận biết lỗi nhưng chỉ giải quyết lỗi xảy ra với cơ cấu chấp hành. Lỗi cảm biến và lỗi hệ thống sẽ được nghiên cứu trong giai đoạn tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Milecki, P. Novak (2023), *Review of Fault-Tolerant Control Systems Used in Robotic Manipulators*, Applied Sciences, Vol.13, Issue 4.
<https://doi.org/10.3390/app13042675>
- [2] Z. Dong, K. Liu, S. Wang (2022), *Sliding Mode Disturbance Observer-Based Adaptive Dynamic Inversion Fault-Tolerant Control for Fixed-Wing UAV*, Drones, Vol.6, Issue 10.
<https://doi.org/10.3390/drones6100295>
- [3] M. N. Hasan, M. Haris, S. Qin (2022), *Fault-tolerant spacecraft attitude control: A critical assessment*, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 130.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100806>
- [4] Y. Wang, B. Jiang, Z. Wu, S. Xie, Y. Peng (2020), *Adaptive Sliding Mode Fault-Tolerant Fuzzy Tracking Control With Application to Unmanned Marine Vehicles*, IEEE Transactions on Systems,

Man, and Cybernetics: Systems, Vol.51, Issue 11, pp.6691-6700.

<https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.2964808>

- [5] L. A. Tuan, L. V. Duong (2022), *Neural fractional-order control of telescopic truck cranes*, Applied Mathematical Modelling, Vol.108, pp.807-824.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.04.006>
- [6] N. Wang, X. Pan, S. F. Su (2020), *Finite-time fault-tolerant trajectory tracking control of an autonomous surface vehicle*, Journal of the Franklin Institute, Vol.357, Issue 16, pp.11114-11135.
<https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2019.05.016>
- [7] J. Zhang, S. Yu, Y. Yan (2020), *Fixed-time velocity-free sliding mode tracking control for marine surface vessels with uncertainties and unknown actuator faults*, Ocean Engineering, Vol.201.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107107>
- [8] J. Zhang, S. Yu, Y. Yan, D. Wu (2020), *Fixed-time output feedback sliding mode tracking control of marine surface vessels under actuator faults with disturbance cancellation*, Applied Ocean Research, Vol. 104.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102378>
- [9] T. Lv, J. Zhou, Y. Wang, W. Gong, M. Zhang (2020), *Sliding mode based fault tolerant control for autonomous underwater vehicle*, Ocean Engineering, Vol. 216.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107855>
- [10] T. I. Fossen (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- [11] R. Skjetne, Ø. Smogelid, T. I. Fossen (2004), *Modeling, Identification, and Adaptive maneuvering of Cybership II: A complete design with experiments*, IFAC Proceedings Volumes, Vol.37, Issue 10, pp.203-208.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31732-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31732-9)

Ngày nhận bài:	16/07/2024
Ngày nhận bản sửa:	08/08/2024
Ngày duyệt đăng:	15/08/2024