THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH ĐỘNG CHO USV THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH

Nguyễn Khắc Tuấn[1*], Lê Trần Thắng[2]

Tóm tắt: *Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất bộ điều khiển ổn định động cho phương tiện nổi tự hành USV (Unmanned Surface Vehicle) với mô hình thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển được thiết kế dựa trên phương pháp trượt tầng, mạng nơ ron nhân tạo được sử dụng để xấp xỉ khi ta xét đến vấn đề mô hình của hệ thống bị thay đổi cũng như các nhiễu bất định tác động trong quá trình hoạt động. Tính ổn định của bộ điều khiển được chứng minh dựa trên phương pháp hàm Lyapunov đồng thời thực hiện mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab cho kết quả điều khiển có chất lượng tốt, bền vững khi có các nhiễu môi trường tác động lên USV.*

Từ khóa: Dynamic positioning control; Adaptive hierarchical sliding mode control; USV.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

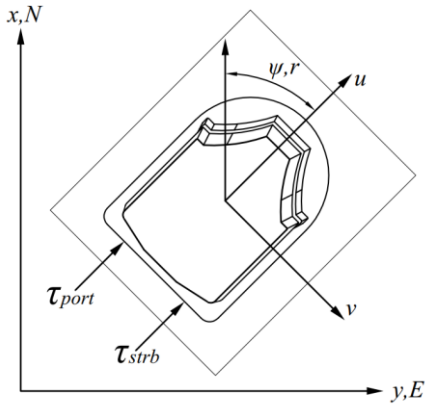
Diện tích mặt nước chiếm khoảng 71% diện tích bề mặt trên trái đất. Do đó, nhu cầu về các phương tiện vận chuyển, thi công xây dựng, cứu hộ cứu nạn, thám hiểm thăm dò và phục vụ quân sự v.v. hoạt động trên và dưới mặt nước là rất lớn. Trong những năm gần đây, vấn đề điều khiển cho các phương tiện tự hành trên mặt nước (USV) thu hút được rất nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học. Điều khiển USV là một thách thức lớn đối với các nhà nghiên cứu bởi tính phi tuyến mạnh và phức tạp của bản thân tàu cũng như môi trường hoạt động. Đã có một số nghiên cứu về điều khiển tuyến tính, phi tuyến đối với tàu, thuyền và các phương tiện mặt nước không người lái trong các công trình [1, 2]. Trong bài báo [3] đã thiết kế bộ điều khiển cho USV sử dụng phương pháp Backstepping. Bộ điều khiển bám theo quỹ đạo dựa trên thuật toán Line-of-Sight được trình bày trong [4]. Phương pháp này dựa trên vị trí hiện tại, vận tốc của tàu và một khoảng ngắm xác định trước để đưa ra góc hướng mũi tàu phù hợp để chuyển động của tàu bám theo một quỹ đạo xây dựng trước. Thuật toán Line-of-Sight cũng được áp dụng trong [5] nhưng với mục tiêu điều khiển ổn định động cho USV. Tuy nhiên, phương pháp này chỉ quan tâm đến vị trí và vận tốc của tàu mà không đề cập đến mô hình động lực học của tàu. Do vậy, thường phải kết hợp phương pháp này với các phương pháp điều khiển khác cho mô hình động lực học của tàu để đưa ra tín hiệu điều khiển là các lực và mô men tác động lên tàu. Điều này dẫn đến khó khăn trong việc chứng minh tính ổn định cho toàn hệ thống. Trong thực tế USV thường được thiết kế với mô hình thiếu cơ cấu chấp hành khi số tín hiệu điều khiển ít hơn số bậc tự do của tàu. Phương pháp điều khiển trượt tầng (**HSMC**, **H**ierarchical **S**liding **M**ode **C**ontrol) chứng tỏ tính hiệu quả và đã được áp dụng trong điều khiển các đối tượng phi truyến ở tài liệu [6-8]. Trong [9] chúng tôi đã đề xuất bộ điều khiển ổn định động cho USV, tuy nhiên, khi thiết kế bộ điều khiển chưa đề cập đến vấn đề bất định của mô hình và ảnh hưởng của các tác động từ môi trường. Để giải quyết vấn đề trên, chúng tôi đề xuất bộ điều khiển trượt tầng thích nghi (**AHSMC**, **A**daptive **H**ierarchical **S**liding **M**ode **C**ontrol) sử dụng mạng nơ ron nhân tạo RBF (Radial Basis Function) để xấp xỉ mô hình cũng như có xét đến nhiễu của môi trường như sóng, gió và dòng chảy tác động lên USV trong yêu cầu điều khiển phương tiện ổn định tại một ví trí làm việc cho trước. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển được thực hiện trên phần mềm Matlab Simulink.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC USV

Theo [1] mô hình ba bậc tự do (surge, sway và yaw) của USV có dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J\left(\underline{\eta}\right)\underline{\upsilon} \\ M_{RB}\dot{\underline{\upsilon}} + C_{RB}\left(\underline{\upsilon}\right)\underline{\upsilon} = \tau_{RB} \end{cases} \tag{1}$$

trong đó: $\underline{\eta}=\begin{bmatrix}x & y & \psi\end{bmatrix}^T$, $\underline{\upsilon}=\begin{bmatrix}u & v & r\end{bmatrix}^T$ là véc tơ vị trí và vận tốc của tàu USV theo các phương *x, y* và góc; $J\left(\underline{\eta}\right)$ là ma trận chuyển trục từ hệ tọa độ gắn thân tới hệ tọa độ gắn với mặt đất; M_{RB} là ma trận quán tính của USV; $C_{RB}\left(\underline{\upsilon}\right)$ là ma trận Coriolis và lực hướng tâm của USV.



Hình 1. *Mô hình tàu SUV.*

$\tau_{RB}=\tau_{hyd}+\tau_{hs}+\tau_{wind}+\tau_{wave}+\tau_{all}$ là tổng véc tơ lực và mô men tác dụng lên USV; $\tau_{hyd}=-M_A\dot{\underline{\upsilon}}_r-C_A\left(\underline{\upsilon}_r\right)\underline{\upsilon}_r-D\left(\underline{\upsilon}_r\right)\underline{\upsilon}_r$ là thành phần lực và mô men do dòng chảy gây ra với $\underline{\upsilon}_r$ là vận tốc tương đối của tàu so với dòng chảy; M_A - Ma trận hằng số khối lượng gia tăng; C_A - Ma trận lực hướng tâm là lực Coriolis do khối lượng gia tăng gây ra; D - Ma trận giảm chấn và ma sát tác động lên tàu.

Nếu giả thiết vận tốc dòng nước là $\underline{\upsilon}_c$ thì $\underline{\upsilon}_r=\underline{\upsilon}-\underline{\upsilon}_c=\begin{bmatrix}u_r & v_r & r\end{bmatrix}^T$ thành phần vận tốc dòng chảy theo phương góc bỏ qua τ_{wind},τ_{wave} là thành phần nhiễu loạn từ môi trường gây ra bởi gió, sóng. Nhiễu này sẽ không biết trước đặt chung là $\Delta\left(\underline{\eta},\underline{\upsilon}\right)$ và trong bài báo này sẽ sử dụng mạng nơ ron RBF để xấp xỉ.

Giả thiết thủy động lực học phương ngang bằng 0 nghĩa là $\tau_{hs}=0$,

$\tau_{all}=\begin{bmatrix}\tau_x & 0 & \tau_z\end{bmatrix}^T=\left[\left(\tau_{port}+\tau_{stbd}\right) \quad 0 \quad \left(\tau_{port}-\tau_{stbd}\right)B/2\right]^T$ - Trong đó, τ_{port},τ_{stbd} véc tơ lực đẩy của động cơ bên trái và bên phải của tàu, τ_x, τ_z là lực đẩy tác và mô men tác động lên USV, B là khoảng cách giữa hai động cơ đẩy.

Hệ phương trình động lực học của hệ được viết lại là

$$\begin{cases}\dot{\underline{\eta}}=J\left(\underline{\eta}\right)\underline{\upsilon}\\ M_{RB}\dot{\underline{\upsilon}}+C_{RB}\left(\underline{\upsilon}\right)\underline{\upsilon}+N\left(\underline{\upsilon}_r\right)=\tau_{all}\end{cases} \tag{2}$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TẦNG THÍCH NGHI CHO USV

3.1. Bộ điều khiển trượt tầng (HSMC)

Theo [9], dựa trên phép biến đổi mô hình, có thể tách hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành thành hai hệ con: một hệ đủ cơ cấu chấp hành và một hệ con tự do, các giá trị $\tau_{all},\underline{\eta}$, $\underline{\upsilon}$ đưa về dạng: $\tau_{all}=\begin{bmatrix}\tau_x & \tau_z & 0\end{bmatrix}^T$, $\underline{\eta}=\begin{bmatrix}x & \psi & y\end{bmatrix}^T$, $\underline{\upsilon}=\begin{bmatrix}u & r & v\end{bmatrix}^T$.

Tương tự đổi chỗ của hàng 2 và hàng 3 của các ma trận thành phần $J(\eta)$, M_{RB}, C_{RB}, $C_A(\upsilon_r)$, $D(\upsilon_r)$ trong hệ (2). Viết lại véc tơ vị trí và vận tốc, véc tơ lực đẩy động cơ của hệ dưới dạng:

$\underline{\eta}=\begin{bmatrix}\underline{\eta}_1 & \underline{\eta}_2\end{bmatrix}^T$ với $\underline{\eta}_1=\begin{bmatrix}x & \psi\end{bmatrix}^T$, $\underline{\eta}_2=y$; $\underline{\upsilon}=\begin{bmatrix}\underline{\upsilon}_1 & \underline{\upsilon}_2\end{bmatrix}^T$ với $\underline{\upsilon}_1=\begin{bmatrix}u & r\end{bmatrix}^T$, $\underline{\upsilon}_2=v$.

$\underline{\upsilon}_r=\begin{bmatrix}\underline{\upsilon}_{r1} & \underline{\upsilon}_{r2}\end{bmatrix}^T$ với $\underline{\upsilon}_{r1}=\begin{bmatrix}u_r & r\end{bmatrix}^T$, $\underline{\upsilon}_{r2}=v_r$; $\tau_{all}=\begin{bmatrix}\underline{\tau} & 0\end{bmatrix}^T$ với $\underline{\tau}=\begin{bmatrix}\tau_x & \tau_z\end{bmatrix}^T$.

Với $\underline{\eta}_1, \underline{\upsilon}_1$ là thành phần đủ cơ cấu chấp hành và $\underline{\eta}_2, \underline{\upsilon}_2$ là thành phần thiếu cơ cấu chấp hành

Nếu xét đến các yếu tố nhiễu $\Delta(\underline{\eta},\underline{\upsilon})$ của sóng, gió vào mô hình thì mô hình động lực học (2) của hệ được viết lại:

$$\begin{cases}\dot{\underline{\eta}}=J(\underline{\eta})\underline{\upsilon}\\ M_{RB}\dot{\underline{\upsilon}}+C_{RB}(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon}+N(\underline{\upsilon}_r)+\Delta(\underline{\eta},\underline{\upsilon})=\tau_{all}\end{cases} \tag{3}$$

Vector hàm bất định được định nghĩa

$$\underline{F}(\underline{\upsilon})=C_{RB}\underline{\upsilon}+N(v_r)+\Delta(\underline{\eta},\underline{\upsilon})=\begin{bmatrix}F_1 & F_2 & F_3\end{bmatrix}^T \tag{4}$$

Hệ (3) được viết lại thành:

$$\begin{cases}\dot{\underline{\eta}}=J\underline{\upsilon}\\ M_{RB}\dot{\underline{\upsilon}}+\underline{F}(\underline{\upsilon})=\underline{\tau}_{all}\end{cases} \tag{5}$$

Trước hết đưa hệ (5) về dạng thiếu cơ cấu chấp hành tương tự như đã trình bày ở [9]. Đặt $\underline{F}(\underline{\upsilon})=\begin{bmatrix}F_{11} & F_{21}\end{bmatrix}^T$, trong đó, $F_{11}=\begin{bmatrix}F_1 & F_2\end{bmatrix}^T=T_1\underline{F}(\underline{\upsilon})$, $F_{21}=F_3=T_2\underline{F}(\underline{\upsilon})$ với $T_1=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$, $T_2=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}$ hệ (5) trở thành:

$$\begin{cases}\dot{\underline{\eta}}_1=J_{11}\underline{\upsilon}_1+J_{12}\underline{\upsilon}_2\\ \dot{\underline{\eta}}_2=J_{21}\underline{\upsilon}_1+J_{22}\underline{\upsilon}_2\\ M_{RB11}\dot{\underline{\upsilon}}_1+M_{RB12}\dot{\underline{\upsilon}}_2+T_1\underline{F}(\underline{\upsilon})=\underline{\tau}\\ M_{RB21}\dot{\underline{\upsilon}}_1+M_{RB22}\dot{\underline{\upsilon}}_2+T_2\underline{F}(\underline{\upsilon})=0\end{cases} \tag{6}$$

Trong đó, $J_{11}=\begin{bmatrix}\cos\psi & -\sin\psi\\ 0 & 0\end{bmatrix}$, $J_{12}=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$, $J_{21}=\begin{bmatrix}\sin\psi & \cos\psi\end{bmatrix}$, $J_{22}=0$

$M_{RB11}=\begin{bmatrix}m & 0\\ -my_G & mx_G\end{bmatrix}$, $M_{RB12}=\begin{bmatrix}-my_G\\ I_z\end{bmatrix}$, $M_{RB21}=\begin{bmatrix}0 & m\end{bmatrix}$, $M_{RB22}=mx_G$

$\bar{M}=M_{11}-M_{12}M_{22}^{-1}M_{21}$, $M_{11}=\begin{bmatrix}m-X_{\dot{u}} & 0\\ -my_G & mx_G-N_{\dot{v}}\end{bmatrix}$, $M_{12}=\begin{bmatrix}-my_G\\ I_z-N_{\dot{r}}\end{bmatrix}$, $M_{21}=\begin{bmatrix}0 & m-Y_{\dot{v}}\end{bmatrix}$,

$M_{22}=mx_G-Y_{\dot{r}}$

Biến đổi tương tự các bước trình bày ở [9] hệ (5) được viết lại dưới dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}}_1 = J_{11}\underline{\upsilon}_1 + J_{12}\underline{\upsilon}_2 \\ \dot{\underline{\upsilon}}_1 = f_1(X) + g_1(X)\underline{\tau} \\ \dot{\underline{\eta}}_2 = J_{21}\underline{\upsilon}_1 + J_{22}\underline{\upsilon}_2 \\ \dot{\underline{\upsilon}}_2 = f_2(X) + g_2(X)\underline{\tau} \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó:

$$X = \begin{bmatrix} \underline{\eta}_1 & \underline{\upsilon}_1 & \underline{\eta}_2 & \underline{\upsilon}_2 \end{bmatrix}^T; f_1(X) = \bar{M}^{-1}\left(-M_{RB12}M_{RB22}^{-1}T_2 + T_1\right)\underline{F}(\underline{\upsilon});$$

$$f_2(X) = -M_{RB22}{}^{-1}\left[T_2 - M_{RB21}\bar{M}^{-1}\left(-M_{RB12}M_{RB22}^{-1}T_2 + T_1\right)\right]\underline{F}(\underline{\upsilon});$$

$$g_1(X) = \bar{M}^{-1}; g_2(X) = -M_{RB22}{}^{-1}M_{RB21}\bar{M}^{-1}.$$

Đặt $M_1 = \bar{M}^{-1}\left(-M_{RB12}M_{RB22}^{-1}T_2 + T_1\right)$

$$M_2 = -M_{RB22}{}^{-1}\left[T_2 - M_{RB21}\bar{M}^{-1}\left(-M_{RB12}M_{RB22}^{-1}T_2 + T_1\right)\right]$$

Ta có $f_1(X) = M_1\underline{F}(\underline{\upsilon})$ và $f_2(X) = M_2\underline{F}(\underline{\upsilon})$.

Như đã trình bày trong [9], tín hiệu điều khiển theo phương pháp điều khiển trượt tầng là:

$$\underline{\tau} = \tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2}$$

$$= -\left(\lambda g_1 + \beta g_2\right)^{-1}\left[\lambda f_1 + \beta f_2 + \lambda\left(k_1 J_{11}\underline{\upsilon}_1 + k_1 J_{12}\underline{\upsilon}_2\right) + \beta\left(k_2 J_{21}\underline{\upsilon}_1 + k_2 J_{22}\underline{\upsilon}_2\right) + k.\underline{S} + \delta \operatorname{sign}(\underline{S})\right] \quad (8)$$

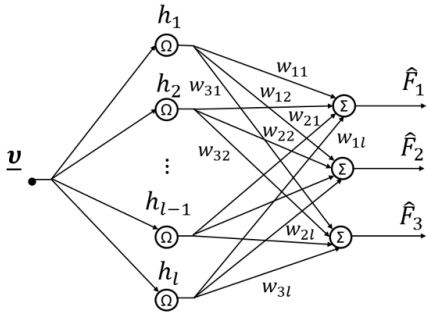
Trong đó, $\underline{S}$ là mặt trượt được định nghĩa:

$\underline{S} = \lambda s_1 + \beta s_2$, trong đó, $\underline{s}_1 = k_1\underline{e}_1 + \underline{e}_2$, $\underline{s}_2 = k_2\underline{e}_3 + \underline{e}_4$, $\underline{e}_1 = \underline{\eta}_1 - \underline{\eta}_{1d}$, $\underline{e}_2 = \underline{\upsilon}_1$, $\underline{e}_3 = \underline{\eta}_2 - \underline{\eta}_{2d}$, $\underline{e}_4 = \underline{\upsilon}_2$ và $\underline{\eta}_{1d}$, $\underline{\eta}_{2d}$ là các giá trị đặt cho quỹ đạo.

$k_1 = diag\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \end{pmatrix} \in R^{2\times 2}, k_2 \in R, \lambda = diag\begin{pmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 \end{pmatrix} \in R^{2\times 2}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix}^T \in R^{2\times 1}$ và $k_{11}, k_{12}, k_2, \lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2 > 0$

3.2. Bộ điều khiển trượt tầng thích nghi (AHSMC) cho USV

Luật điều khiển (8) chỉ thực hiện được khi biết rõ các tham số của mô hình như những ma trận C_{RB}, $N(v_r)$ và nhiễu $\Delta(\underline{\eta}, \underline{\upsilon})$ của sóng, gió. Thực tế việc xác định chính xác các thông số của ma trận này rất khó khăn nhiều khi không thể do sai số cảm biến, ảnh hưởng nhiễu tác động từ môi trường như sức gió, ảnh hưởng của dòng chảy,… Do vậy, bài báo đề xuất biểu diễn các thành phần bất định của mô hình thành một véc tơ hàm bất định và tìm cách xấp xỉ hàm bất định này.



Hình 2. *Cấu trúc mạng nơ ron RBF được sử dụng.*

Trong ứng dụng xấp xỉ các hàm phi tuyến, chúng tôi sử dụng mạng nơ ron hướng tâm RBF.

Theo các tài liệu [10] thì các hàm phi tuyến trơn đáp ứng các điều kiện trong định lý Stone-Weiestrass [11] đều có thể xấp xỉ được bằng mạng nơ ron RBF với độ chính xác tùy ý. Xu thế ngày nay, thường sử dụng mạng nơ ron hướng tâm hai lớp bao gồm lớp vào và lớp ra, lớp vào là những nơ ron hướng tâm, để tăng tốc độ hội tụ thường lựa chọn số lượng lớn, lớp ra là các nơ ron tuyến tính. Do đó, bài báo sẽ sử dụng mạng nơ ron hướng tâm RBF hai lớp để xấp xỉ véc tơ hàm bất định $\underline{F}(\underline{\upsilon})$ đã được định nghĩa ở (4)

Cấu trúc mạng nơ ron RBF dùng để xấp xỉ $F(\underline{\upsilon})$ như hình 2.

Đầu vào là véc tơ vận tốc $\underline{\upsilon} = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix} \in R^3$

$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} & w_{31} \\ w_{12} & w_{22} & w_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{1l} & w_{2l} & w_{3l} \end{bmatrix} \in R^{l\times 3}$ là ma trận trọng số, véc tơ $\hat{\underline{F}} = \begin{bmatrix} \hat{F}_1 & \hat{F}_2 & \hat{F}_3 \end{bmatrix}^T \in R^3$ là đầu ra ước lượng của $\underline{F}(\underline{\upsilon})$. Đầu ra của lớp vào là $\underline{h} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_l \end{bmatrix}^T \in R^l$, với các h_i được xác định như sau:

$$h_i = \exp\left(-\frac{\left\|\underline{\upsilon} - \underline{c}_i\right\|^2}{b_i^2}\right) \Bigg/ \sum_{j=1}^{l} \exp\left(-\frac{\left\|\underline{\upsilon} - \underline{c}_j\right\|^2}{b_j^2}\right), \text{ với } i = 1,2,...,l \tag{9}$$

Nếu gọi W là bộ trọng số tối ưu của mạng nơ ron thỏa mãn $\underline{F}(\underline{\upsilon}) = W^T\underline{h} + \underline{\varepsilon}$ với $\underline{\varepsilon}$ là sai số xấp xỉ và $\hat{W}$ là ước lượng của W thỏa mãn $\hat{\underline{F}} = \hat{W}^T\underline{h}$. Từ đây, ta có sai số trọng số $\tilde{W} = W - \hat{W}$.

Thiết kế bộ điều khiển trượt tầng như trình bày trong [9]. Chỉ khác thay biểu thức $f_1(X)$, $f_2(X)$ là hai biểu thức phụ thuộc vào hàm bất định $\bar{F}$ vào ta được tín hiệu điều khiển:

$$\begin{aligned} \underline{\tau} &= -(\lambda g_1 + \beta g_2)^{-1}\left[\lambda M_1\hat{\underline{F}} + \beta M_2\hat{\underline{F}}\right] \\ &-(\lambda g_1 + \beta g_2)^{-1}\left[\lambda\left(k_1J_{11}\underline{\upsilon}_1 + k_1J_{12}\underline{\upsilon}_2\right) + \beta\left(k_2J_{21}\underline{\upsilon}_1 + k_2J_{22}\underline{\upsilon}_2\right) + k.\underline{S} + \delta\,\mathrm{sign}(\underline{S})\right] \end{aligned} \tag{10}$$

Phát biểu định lý và chứng minh tính ổn định của hệ kín.

Định lý: Hệ thống điều khiển kín bao gồm đối tượng điều khiển (7) và bộ điều khiển (10) với thành phần bất định $\underline{F}(\underline{\upsilon})$ (4) được xấp xỉ bằng mạng nơ ron hướng tâm có luật cập nhật:

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma\left[\underline{h}.\underline{S}^T\left(\lambda M_1 + \beta M_2\right) - \alpha\|\underline{S}\|\hat{W}\right] \tag{11}$$

Trong đó, Γ là ma trận đối xứng xác định dương, và thỏa mãn điều kiện $\|\underline{S}\| > \left(\varepsilon_N + \alpha\|W\|_F^2/4\right)\Big/\lambda_{\min}$ ($\|W\|_F$ là chuẩn Frobenius của W).

với $\varepsilon_N = \left\|\left(\lambda M_1 + \beta M_2\right)\underline{\varepsilon}\right\|$ (12)

α là hằng số dương; $\lambda_{\min}$ là giá trị riêng nhỏ nhất của ma trận đường chéo k thì hệ kín ổn định Lyapunov.

Chứng minh:

Viết lại biểu thức đạo hàm mặt trượt được định nghĩa trong mục 3.1.

$$\dot{\underline{S}} = \left[\lambda(k_1 J_{11}\underline{\upsilon}_1 + k_1 J_{12}\underline{\upsilon}_2 + f_1 + g_1\underline{\tau}) + \beta(k_2 J_{21}\underline{\upsilon}_1 + k_2 J_{22}\underline{\upsilon}_2 + f_2 + g_2\underline{\tau})\right] \quad (13)$$

Thay biểu thức của f_1 và f_2 vào (13) thu được

$$\dot{\underline{S}} = \left[\lambda(k_1 J_{11}\underline{\upsilon}_1 + k_1 J_{12}\underline{\upsilon}_2 + M_1\underline{F} + g_1\underline{\tau}) + \beta(k_2 J_{21}\underline{\upsilon}_1 + k_2 J_{22}\underline{\upsilon}_2 + M_2\underline{F} + g_2\underline{\tau})\right] \quad (14)$$

Thay (10) vào (14) rút gọn thu được:

$$\dot{\underline{S}} = -k\underline{S} - \delta sign(\underline{S}) + (\lambda M_1 + \beta M_2)\left(\underline{F} - \hat{\underline{F}}\right)$$

$$\dot{\underline{S}} = -k\underline{S} - \delta sign(\underline{S}) + (\lambda M_1 + \beta M_2)\left(\mathrm{W}^T - \hat{\mathrm{W}}^T\right)\underline{h} + (\lambda M_1 + \beta M_2)\underline{\varepsilon} \quad (15)$$

Chọn hàm Lyapunov cho hệ như sau:

$$V = \frac{1}{2}S^T S + \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(\tilde{\mathrm{W}}^T\Gamma^{-1}\tilde{\mathrm{W}}\right) \quad (16)$$

Đạo hàm hàm V theo thời gian:

$$\dot{V} = \underline{S}^T\dot{\underline{S}} + tr\left(\tilde{W}^T\Gamma^{-1}\dot{\tilde{W}}\right) \quad (17)$$

Sử dụng (15) và tín hiệu điều khiển trong (10) qua một vài phép biến đổi (17) trở thành:

$$\dot{V} = -k\underline{S}^T\underline{S} - \delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) + \underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2)\underline{\varepsilon} + \underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2)\tilde{\mathrm{W}}^T\underline{h} + tr\left(\tilde{W}^T\Gamma^{-1}\dot{\tilde{W}}\right)$$

$$= -k\underline{S}^T\underline{S} - \delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) + \underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2)\underline{\varepsilon} + tr\left\{\tilde{W}^T\left[\underline{h}\underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2) - \Gamma^{-1}\dot{\hat{\mathrm{W}}}\right]\right\} \quad (18)$$

Thế (11) vào (18) trở thành:

$$\dot{V} = -k\underline{S}^T\underline{S} - \delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) + \underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2)\underline{\varepsilon} + \alpha\|\underline{S}\|tr\left(\tilde{\mathrm{W}}^T\left(\mathrm{W} - \tilde{\mathrm{W}}\right)\right) \quad (19)$$

Sử dụng bất đẳng thức Cauchy – Schawrz có dạng như sau:

$$tr\left(\tilde{\mathrm{W}}^T\left(\mathrm{W} - \tilde{\mathrm{W}}\right)\right) \le \left\|\tilde{W}\right\|_F\left\|\mathrm{W} - \tilde{\mathrm{W}}\right\|_F \le \left\|\tilde{W}\right\|_F\|W\|_F - \left\|\tilde{W}\right\|_F^2$$

Ta có: $\dot{V} \le -k\underline{S}^T\underline{S} - \delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) + \underline{S}^T(\lambda M_1 + \beta M_2)\underline{\varepsilon} + \alpha\|\underline{S}\|\left(\left\|\tilde{W}\right\|_F\|W\|_F - \left\|\tilde{W}\right\|_F^2\right)$

Sử dụng điều kiện (12) ta có:

$$\dot{V} \le -\delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) - \alpha\|\underline{S}\|\left(\left\|\tilde{W}\right\|_F - \frac{1}{2}\|W\|_F\right)^2 - \|\underline{S}\|\left(\lambda_{\min}\|\underline{S}\| - \varepsilon_N - \alpha\frac{\|W\|_F^2}{4}\right)$$

$$\le -\delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) - \alpha\|\underline{S}\|\left(\left\|\tilde{W}\right\|_F - \frac{1}{2}\|W\|_F\right)^2 - \|\underline{S}\|\left(\lambda_{\min}\frac{\varepsilon_N + \alpha\frac{\|\mathrm{W}\|_F^2}{4}}{\lambda_{\min}} - \varepsilon_N - \alpha\frac{\|W\|_F^2}{4}\right)$$

$$\le -\delta\underline{S}^T sign(\underline{S}) - \alpha\|\underline{S}\|\left(\left\|\tilde{W}\right\|_F - \frac{1}{2}\|W\|_F\right)^2 \le 0 \quad (20)$$

Như vậy theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov hệ thống trên ổn định.

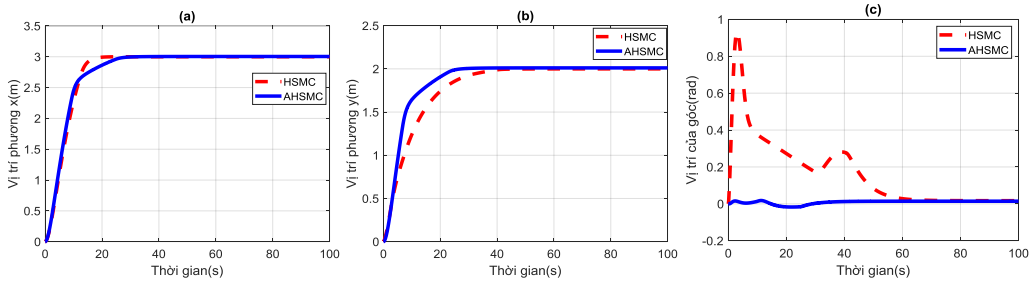
4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm chứng tính đúng đắn của bộ điều khiển trượt tầng thích nghi đề xuất ở trên, bài báo thực hiện mô phỏng, so sánh chất lượng điều khiển của bộ điều khiển trượt tầng thích nghi và bộ điều khiển trượt tầng với thông số mô hình tàu được sử dụng theo tài liệu [1]. Các tham số được

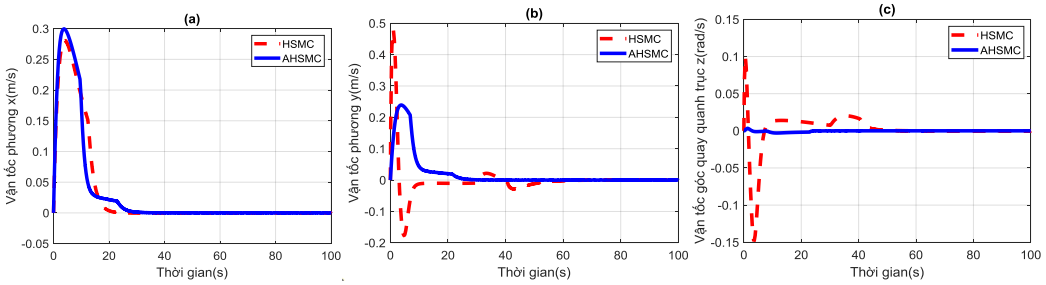
của bộ điều khiển là: $\lambda = diag(100,100)$, $\beta = [48 \quad 160]^T$, $k = diag(0.1,0.1)$, $k_1 = diag(0.5,0.5)$, $k_2 = 10$. Mạng nơ ron RBF một lớp ẩn 50 nút, vận tốc của dòng nước là hàm thời gian $\underline{\upsilon}_c = [0.8\sin(0.7t) \quad 0.2\sin(0.5t) \quad 0]^T$ (m/s)

Với vị trí đặt mong muốn theo phương *x* là 3 (m), vị trí đặt mong muốn theo phương *y* là 2 (m), giá trị đặt góc điều hướng là 0 (rad).

Trường hợp không có nhiễu sóng, gió tác động:

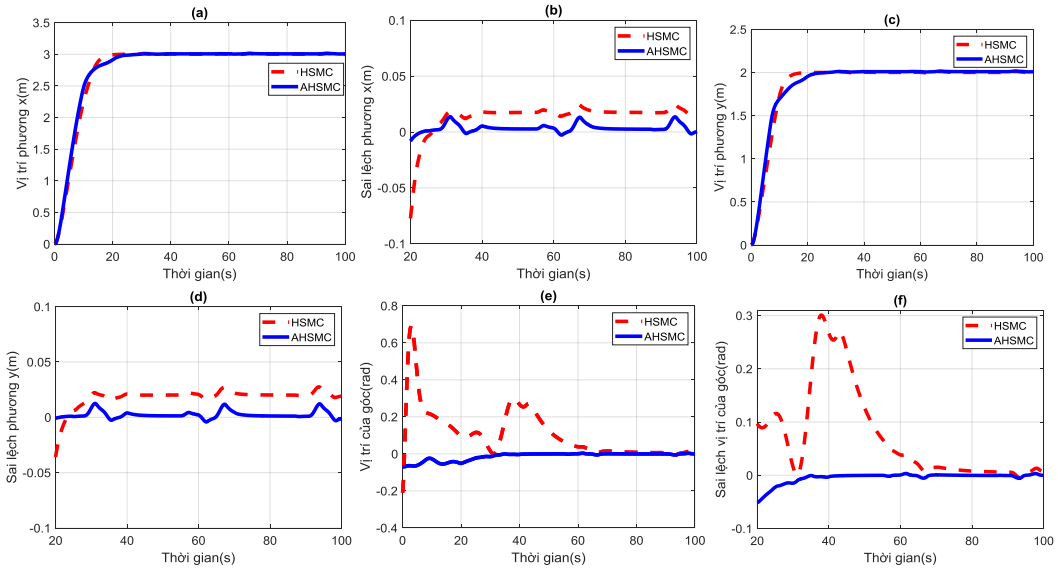


Hình 3. *Vị trí của tàu trường hợp không nhiễu sóng, gió tác động.*

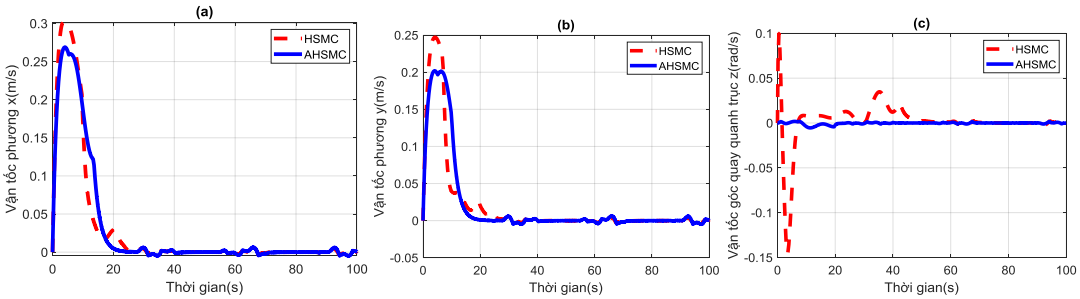


Hình 4. *Vận tốc của tàu trường hợp không nhiễu sóng, gió tác động.*

Trường hợp có nhiễu tác động $\Delta(\underline{\eta},\underline{\upsilon}) = [2|u|^2 + 0.05 \quad |r|^3 + \sin(v) \quad 0]^T$



Hình 5. *Vị trí và sai lệch vị trí của tàu trường hợp có nhiễu sóng, gió tác động.*



Hình 6. *Vận tốc của tàu trường hợp có nhiễu sóng, gió tác động.*

Như vậy, dựa vào kết quả mô phỏng chúng ta thấy, bộ điều khiển trượt tầng thích nghi AHSMC cho chất lượng điều khiển tốt khi giá trị mô phỏng bám sát với giá trị đặt mong muốn với thời gian xác lập khoảng 25 s, sai lệch nhỏ (hình 3 a, b, c).

Với cả hai trường hợp có nhiễu sóng, gió tác động và không có thì bộ điều khiển AHSMC (đồ thị đường nét liền) đều cho chất lượng tốt hơn bộ HSMC thuần túy (đồ thị đường nét đứt) khi có sai lệch nhỏ hơn và độ quá điều chỉnh nhỏ hơn (hình 5 d, e, f).

5. KẾT LUẬN

Thuật toán điều khiển trượt tầng thích nghi là một bước phát triển của thuật toán trượt tầng dùng điều khiển ổn định động cho USV, các kết quả chứng minh và mô phỏng trong bài báo thể hiện rõ ưu điểm của trượt tầng thích nghi trong trường hợp lý tưởng cũng như trong trường hợp có nhiễu ngoài tác động. Trong các nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi sẽ áp dụng thuật toán cho các mô hình USV khác nhau để tiếp tục kiểm chứng phát triển thuật toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Alejandro G G, Ivana C G, David B A and Leonardo G, "*Control of an Unmanned surface Vehicle Based on Adaptive Dynamic Programming and Deep Reinforcement Learning*" 2020 Proc. Int. Conf on Deep Learning Technologies. 4th (ICDLT 2020) p 118-122.

[2]. Wilhelm B. Klinger, Ivan R. Bertaska, Member, Karl D. von Ellenrieder, Senior Member, and M. R. Dhanak, " *Control of an Unmanned Surface Vehicle with Uncertain Displacement and Drag*," J of Oceanic Engineering, **Vol. 42**. (2017), pp. 458 - 476

[3]. Zaopeng Dong, Lei Wan, Yueming Li, Tao Liu and Guocheng Zhang, "*Trajectory tracking control of underactuated USV based on modified backstepping approach*," Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2015) pp. 817- 832.

[4]. Tao Liu, Zaopeng Dong, Hongwang Du, Lifei Song, Yunsheng Mao, "*Path Following Control of the Underactuated USV Based On the Improved Line-of-Sight Guidance Algorithm*", POLISH MARITIME RESEARCH 1 (93) **Vol. 24.** (2017), pp. 3-11

[5]. Arvind Pereira, Jnaneshwar Das, and Gaurav S. Sukhatme, "*An Experimental Study of Station Keeping on an Underactuated ASV*," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept, 22-26, Nice, France (2008)

[6]. Yao Zou, "*Nonlinear robust adaptive hierarchical sliding mode control approach for quadrotors*", Int. J. Robust Nonlinear Control, **Vol. 27.** (2016), pp. 925-941

[7]. Long Chen, Hai Wang, Yunzhi Huang, Zhaowu Ping, Ming Yu, Xuefeng Zheng, Mao Ye, Youhao Hu, "*Robust hierarchical sliding mode control of a two-wheeled self-balancing vehicle using perturbation estimation*", J. Mechanical Systems and Signal Processing, **Vol 139**, May 2020.

[8]. Wei Liu, Si-yi Chen and Hui-xian Huang "*Double Closed-loop Integral Terminal Sliding Mode for a Class of Underactuated Systems Based on Sliding Mode Observer*", Int. J of Control, Automation and Systems, **Vol. 18**. (2020) pp 339–350

[9]. T.K. Nguyen, Th.Tr. Le, and C.X. Nguyen "*Reduce energy loss with dynamic positioning controller for USV based on Hierarchical Sliding Mode Control*", Int Conf of Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems, May 27-28, Rostov-on-Don, Russia (2021).

[10]. Ciuca I. and Ware J. "*Layered neural networks as universal approximators*", Proc. of International Conference, 5th Computational Intelligence theory and Applications, (1997) pp. 411-415
[11]. Cotter N. E. "*The Stone-Weierstrass theorem and its application to neural networks*", IEEE Transactions on Neural Networks, **Vol. 1**, (1990) pp. 290-295.

ABSTRACT

DESIGNING STATION KEEPING CONTROLLER
FOR UNDERACTUATED UNMANNED SURFACE VEHICLE

This paper proposed Dynamic Stability Controller for the USV (Unmanned Surface Vehicle) with a model lacking an actuator. The controller was designed based on the Hierarchical Sliding mode method, the artificial neural network is used for approximation when we consider the problem that the model of the system is changed as well as the uncertainties disturbance affecting during operation. The stability of the controller is proven based on the method of Lyapunov function and the simulation of the system on Matlab software gives good and stable control results when there are environmental disturbances affecting the USV.

Keywords: Dynamic positioning control; Adaptive hierarchical sliding mode control; USV.

Nhận bài ngày 16 tháng 9 năm 2021
Hoàn thiện ngày 20 tháng 10 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 28 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: [1]Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh;
[2]Viện Tự động hóa kỹ thuật quân sự, Viện KHCN quân sự.
[*]Email: khactuan37@gmail.com.