

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING CHO THIẾT BỊ LẶN TỰ HÀNH

DESIGNING A BACKSTEPPING CONTROLLER FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

Vũ Văn Quang¹, Đinh Anh Tuấn¹, Lê Xuân Hải^{2,*}, Kim Đình Thái², Trần Việt Hoàng³, Nguyễn Anh Đức³

TÓM TẮT

Điều khiển phương tiện chuyển động ngầm không người lái AUV (Autonomous Underwater Vehicles) trong điều kiện thực tế đang là một thách thức hiện nay. AUV là một hệ thống thiếu chấp hành và thường bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài không biết trước như gió, dòng chảy, mật độ lưu lượng nước. Bài báo này đề xuất về một thuật toán điều khiển dựa trên kỹ thuật Backstepping để điều khiển vị trí, góc điều hướng và độ sâu của tàu bám theo giá trị đặt mong muốn. Các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink đã chứng minh tính hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất.

Từ khóa: Thiết bị lặn tự hành, điều khiển Backstepping, phương pháp điều khiển.

ABSTRACT

Controlling autonomous underwater vehicles (AUVs) is a current research challenge in reality. AUV is an underactuated system. In addition, it is often affected by unpredictable external disturbances such as wind, flow, and water density. This paper proposed a novel controller based on the Backstepping technique to control position, navigation angle, and ship's depth as desired. The simulation results on Matlab/Simulink software show that the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: Autonomous Underwater Vehicles, Backstepping controller, control method.

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Công nghệ Hải, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: hailx@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/6/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 01/8/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2021

1. GIỚI THIỆU

Những năm đầu của thế kỷ XX cho đến nay, những nghiên cứu về hệ thống điều khiển UAV được quan tâm và phát triển không ngừng. Từ thập niên 20 đến thập niên 60 các công bố chủ yếu về phương pháp điều khiển động (xây dựng trên nền tảng bộ điều khiển PID). Tuy nhiên đến tận năm 1960 bộ điều khiển này mới được sử dụng rộng rãi. Đến những năm đầu của thập niên 70 khi giá nhiên liệu trên thế giới tăng cao dẫn đến nhu cầu phát triển và sử

dụng các phương pháp điều khiển tiên tiến để đáp ứng yêu cầu cấp thiết là giảm mức tiêu hao năng lượng để giảm giá thành vận chuyển. Phần lớn các công trình công bố dựa trên điều khiển tối ưu toàn phương (LQR hoặc LQG) [3, 4, 5]. Nhược điểm cơ bản của các phương pháp này là phải biết chính xác mô hình toán học của hệ thống, nhưng trong thực tế các phương tiện hàng hải là các đối tượng bất định (dưới dạng tham số hoặc hàm số), ngoài ra chịu ảnh hưởng rất lớn của nhiễu môi trường. Do vậy những năm gần đây lý thuyết điều khiển thích nghi được quan tâm nghiên cứu nhiều hơn cho các hệ thống này [6, 8, 9, 10, 11]. Thập niên cuối của thế kỷ XX bùng nổ các nghiên cứu về điều khiển phi tuyến, đặc trưng là ứng dụng hàm điều khiển thích nghi Lyapunov cho hệ thống lái tàu [7, 12, 13, 14]. Hướng nghiên cứu này mang lại nhiều thành công trong điều khiển các đối tượng phi tuyến có mô hình bất định kiểu hằng số.

Hiện nay đối với các hệ thống phi tuyến bất định kiểu hàm số và chịu ảnh hưởng của nhiễu môi trường thì các phương pháp điều khiển hiện đại được áp dụng nhằm mục đích nâng cao chất lượng luôn là những thách thức với các nhà khoa học. Đó cũng là động lực cho việc lựa chọn nghiên cứu của nhóm tác giả trong bài báo này.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA THIẾT BỊ TÀU LẶN S-AUV

2.1. Mô hình động lực học thiết bị lặn tự hành AUV 4 bậc tự do

Đối với một thiết bị hoạt động trong môi trường nước thì việc điều khiển chính xác các vị trí, tọa độ của cả 6 bậc là hết sức phức tạp [1, 2]. Để đơn giản hóa đối với các loại thiết bị lặn tự hành cỡ nhỏ ta có thể bỏ 2 bậc tự do không cần thiết là: góc θ (chuyển động quay lật) và góc Φ (chuyển động quay lắc), thì phương trình chuyển động của thiết bị lặn tự hành AUV gồm 4 bậc tự do được biểu diễn qua các đại lượng (động cơ đẩy, một cánh lái hướng, hai cánh lái phụ để lặn nổi). Tuy nhiên trong quá trình điều khiển vẫn đảm bảo được yêu cầu nhiệm vụ đặt ra như bám vị trí tọa độ (x, y) , góc điều hướng của AUV (ψ) và vị trí trục z (độ sâu lặn). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung xây dựng bộ điều khiển Backstepping với mô hình thông số của AUV được tính toán lựa chọn phù hợp từ đối tượng trích tài liệu [15].

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] &= X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(pr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] &= Y \\ m[w - uq + vp - z_g(q^2 + p^2) + x_g(rp - q) + y_g(rq + \dot{p})] &= Z \\ I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})qp + m[x_g(\dot{v} - wq + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] &= N \end{aligned} \quad (1)$$

2.2. Mô hình động lực học của AUV bốn bậc tự do trên tọa độ không gian 3 chiều

Mô hình chuyển động bốn bậc tự do của tàu ngầm AUV gồm: $\eta = [x, y, z, \psi]^T$ là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục Ox, Oy, Oz và góc điều hướng tàu quay quanh trục Oz; $v = [u, v, w, r]^T$ là véc-tơ vận tốc dài theo các phương Ox, Oy, Oz và tốc độ quay xung quanh trục Oz.

Phương trình động học phi tuyến của tàu ngầm AUV bốn bậc tự do như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó, ma trận quay xung quanh trục Oz được biểu diễn như sau:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ma trận quán tính hệ thống:

$$M = \begin{bmatrix} m + X_{\dot{u}} & 0 & X_w & -my_g \\ 0 & m + Y_{\dot{v}} & 0 & Y_r + mx_g \\ Z_{\dot{u}} & 0 & m + Z_w & 0 \\ -my_g & mx_g + N_v & 0 & I_z + N_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận Coriolis và lực hướng tâm hệ thống:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -mr & 0 & -mx_g r - a_2 \\ mr & 0 & 0 & -my_g r + a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ mx_g r + a_2 & my_g r - a_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ma trận suy giảm thủy động lực học:

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{|u|} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{|v|} & 0 & 0 \\ Z_u & 0 & Z_w + Z_{|w|} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{|p|} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Với các ma trận M, J(η), C(v), D(v) thỏa mãn các tính chất sau:

- (1) $M = M^T > 0$
- (2) $C(v) = C^T(v)$
- (3) $D(v) > 0$

(4) J(η) là ma trận quay xung quanh trục Oz và là ma trận trực giao $J^{-1}(\eta) = J^T(\eta)$

3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO AUV BẰNG KỸ THUẬT BACKSTEPPING

Bài toán điều khiển chuyển động thông qua $\eta = [x, y, z, \psi]^T$ là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục Ox, Oy, Oz và góc điều hướng tàu quay quanh trục Oz; $v = [u, v, w, r]^T$ là véc-tơ vận tốc dài theo các phương Ox, Oy, Oz và tốc độ quay xung quanh trục Oz. Để giải quyết vấn đề trên, bài báo đề xuất sử dụng bộ điều khiển Backstepping bởi vì nó là phương pháp phù hợp nhất để điều khiển những hệ thiếu cơ cấu chấp hành.

Ta viết dạng tổng quát hóa như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = f_1(\mathbf{X}) + g_1(\mathbf{X})\tau_1 \\ \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = f_2(\mathbf{X}) + g_2(\mathbf{X})\tau_2 \end{cases} \quad (7)$$

Với:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [\eta_1 \quad v_1 \quad \eta_2 \quad v_2]^T \\ f_1(\mathbf{X}) &= \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1 v_1 - \bar{C}_2 v_2) \\ g_1(\mathbf{X}) &= \bar{M}^{-1} \\ f_2(\mathbf{X}) &= -M_{22}^{-1} \left[M_{21} \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1 v_1 - \bar{C}_2 v_2) \right. \\ &\quad \left. + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2 \right] \\ g_2(\mathbf{X}) &= -M_{22}^{-1} M_{21} \bar{M}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

Định nghĩa véc tơ sai số giữa tín hiệu đầu ra và tín hiệu đặt như sau:

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 - \eta_{1d} \\ \eta_2 - \eta_{2d} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Coi hệ (7) là hai hệ con (10), (11) với tín hiệu điều khiển τ_1, τ_2 cho từng hệ, ta có:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = f_1(\mathbf{X}) + g_1(\mathbf{X})\tau_1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = f_2(\mathbf{X}) + g_2(\mathbf{X})\tau_2 \end{cases} \quad (11)$$

Tín hiệu điều khiển chung hệ (7) được chọn theo luật sau:

$$\tau = \alpha\tau_1 + \beta\tau_2 \quad (12)$$

Với α, β là các hằng số dương.

Hệ (10), (11) là các hệ truyền ngược chặt bậc 2, theo kỹ thuật Backstepping, để xác định tín hiệu điều khiển τ_1, τ_2 ta phải tiến hành theo hai bước:

Tổng hợp điều khiển τ_1 . Xét hệ (10)

Bước 1: Gọi sai lệch bám vị trí đặt là e_1 , ta có:

$$e_1 = \eta_1 - \eta_{1d} \quad (13)$$

Đạo hàm e_1 theo thời gian ta được:

$$\dot{e}_1 = \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_{1d} = J_{11}v_1 - \dot{\eta}_{1d} \quad (14)$$

Đặt $e_2 = v_1 - \alpha_1$ với α_1 là tín hiệu điều khiển ảo

Thay vào (14) ta được:

$$\dot{e}_1 = \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_{1d} = J_{11}(e_2 + \alpha_1) - \dot{\eta}_{1d} \quad (15)$$

Để xác định tín hiệu điều khiển ảo đảm bảo $e_1 \rightarrow 0$, ta chọn hàm Lyapunov:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^T e_1 \quad (16)$$

Đạo hàm V_1 theo thời gian ta có:

$$\dot{V}_1 = e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T (J_{11}(e_2 + \alpha_1) - \dot{\eta}_{1d}) = -c_1 e_1^T e_1 + e_1^T J_{11} e_2 \quad (17)$$

Để có (17) thì tín hiệu điều khiển ảo có dạng như sau:

$$\alpha_1 = J_{11}^{-1}(-c_1 e_1 + \dot{\eta}_{1d}) \quad (18)$$

với c_1 là hằng số dương. Để $e_1 \rightarrow 0$ thì $e_2 \rightarrow 0$

Bước 2: Ta có

$$e_2 = v_1 - \alpha_1 \quad (19)$$

Đạo hàm e_2 theo thời gian ta được:

$$\dot{e}_2 = \dot{v}_1 - \dot{\alpha}_1 = f_1(\mathbf{X}) + g_1(\mathbf{X})\tau_1 - \dot{\alpha}_1 \quad (20)$$

Để xác định tín hiệu điều khiển τ_1 đảm bảo $e_2 \rightarrow 0$, ta chọn hàm Lyapunov:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \quad (21)$$

Đạo hàm V_2 theo thời gian ta có:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2^T \dot{e}_2 = -c_1 e_1^T e_1 + e_1^T J_{11} e_2 + e_2^T (f_1(\mathbf{X}) + g_1(\mathbf{X})\tau_1 - \dot{\alpha}_1) \quad (22)$$

Chọn tín hiệu điều khiển từ hệ (22):

$$\tau_1 = g_1^{-1}(\mathbf{X})(-c_2 e_2 - J_{11}^T e_1 - f_1(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_1) \quad (23)$$

với c_2 là hằng số dương

Thay phương trình (23) vào (22) ta có:

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_1^T e_1 - c_2 e_2^T e_2 \leq 0 \quad (24)$$

Tổng hợp điều khiển τ_2 . Xét hệ (11)

Thiết kế theo phương pháp Backstepping tương tự như thiết kế τ_2 ta được tín hiệu điều khiển cho hệ con thứ hai:

$$\tau_2 = g_2^{-1}(\mathbf{X})(-c_4 e_4 - J_{22}^T e_3 - f_2(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_2) \quad (25)$$

Với $e_3 = \eta_2 - \eta_{2d}$

$$e_4 = \dot{\eta}_2 - \dot{\eta}_{2d}$$

$$\alpha_2 = J_{22}^{-1}(-c_3 e_3 + \dot{\eta}_{2d})$$

c_3, c_4 là các hằng số dương

Theo (12) tín hiệu điều khiển cho thiết bị lặn AUV là:

$$\tau = \alpha\tau_1 + \beta\tau_2 \quad (26)$$

Với τ_1, τ_2 tính theo (23), (25) thay vào phương trình (26) ta có:

$$\tau = \alpha.g_1^{-1}(\mathbf{X})(-c_2 e_2 - J_{11}^T e_1 - f_1(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_1) + \beta.g_2^{-1}(\mathbf{X})(-c_4 e_4 - J_{22}^T e_3 - f_2(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_2) \quad (27)$$

4. KẾT QUẢ SỐ

Để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển Backstepping áp dụng cho thiết bị tàu AUV, mô phỏng được thực hiện với các bộ tham số như bảng 1.

Bảng 1. Tham số mô hình thiết bị AUV

M	18,5kg	\dot{X}_u	$6,83.10^{-6}$	Z_0	0
K	100	$X_{u u }$	-0,58	$Z_{w w }$	$1,15.10^{-6}$
δ	5	\dot{X}_w	$-1,13.10^{-6}$	N_r	-12,32
k_1	0,05	Y_v	0,08	$N_{r r }$	$0,5.10^{-6}$
k_2	5	Y_r	-1,03	\dot{N}_v	0,32
λ	500	\dot{Y}_v	-0,85	\dot{N}_r	-2,15
β	2,5	$\dot{Y}_{v v }$	-0,62	I_z	1,57
x_g	0,5	Z_w	4,57		
y_g	0,5	\dot{Z}_u	0,32		
X_u	6,53	\dot{Z}_w	$-0,32.10^{-6}$		

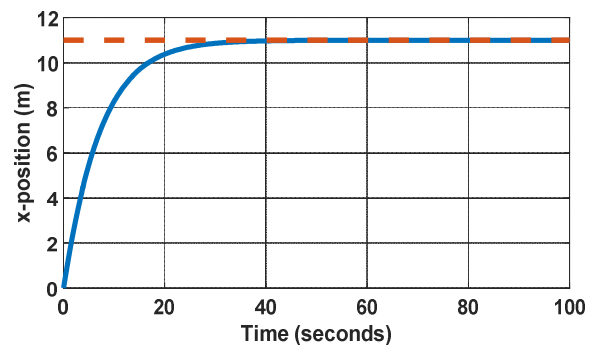
Thông số bộ điều khiển:

$$c_1 = \text{diag}\{0,15 \ 0,12\}; c_2 = \text{diag}\{90 \ 90\};$$

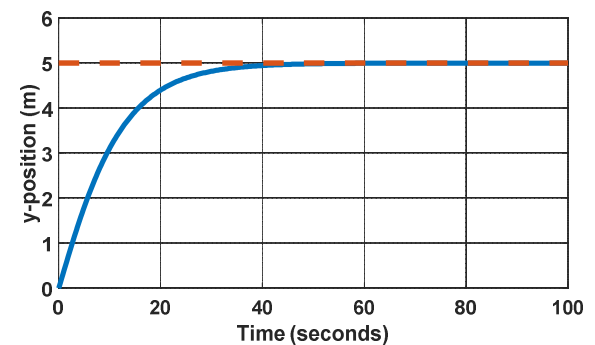
$$c_3 = \text{diag}\{0,2 \ 0,2\}; c_4 = \text{diag}\{0,1 \ 0,1\};$$

$$\lambda = 0,65; \beta = 0,05$$

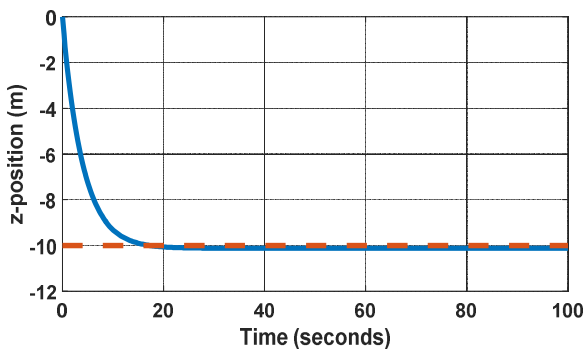
Trường hợp 1: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tính từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như sau: $\eta_{1d} = [11 \ 5]^T$ và $\eta_{2d} = [-10 \ 0,3]^T$



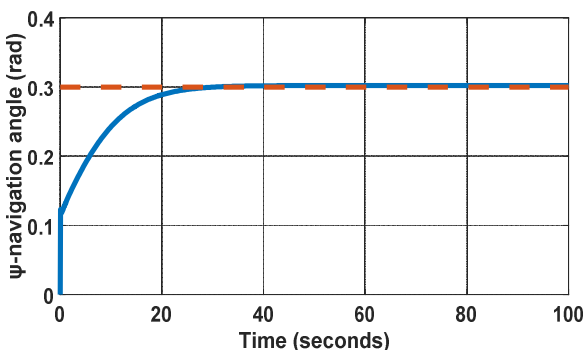
(a) Vị trí theo phương Ox



(b) Vị trí theo phương Oy



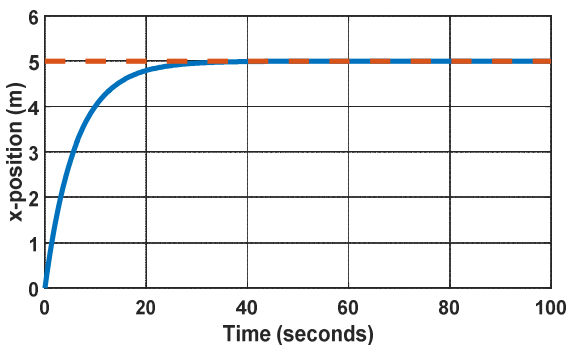
(c) Vị trí theo phương Oz



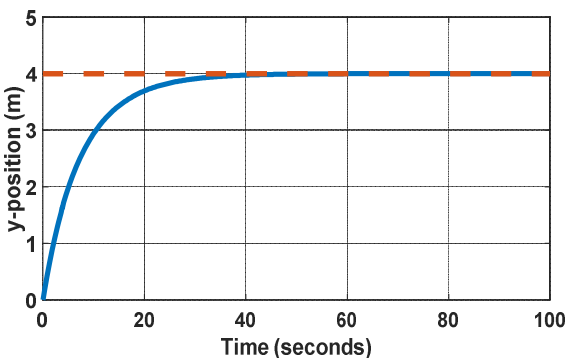
(d) Góc điều hướng của AUV

Hình 1. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 1

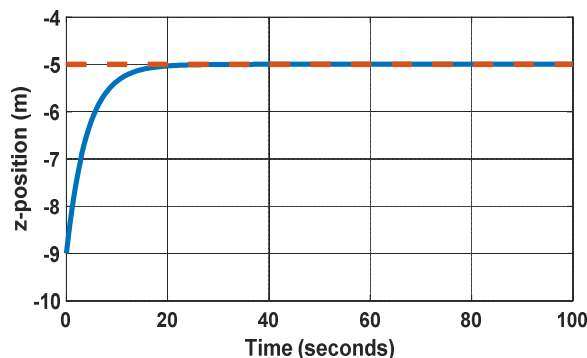
Trường hợp 2: Thiết bị AUV nổi lên từ độ sâu -9(m) lên độ sâu -5(m) tính từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như sau: $\eta_{1d} = [5 \ 4]^T$ và $\eta_{2d} = [-5 \ 0]^T$



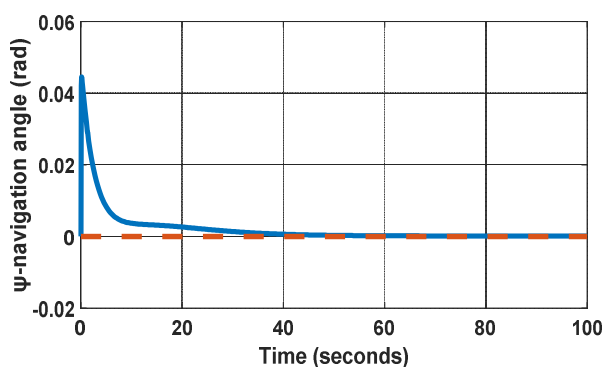
(a) Vị trí theo phương Ox



(b) Vị trí theo phương Oy



(c) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV

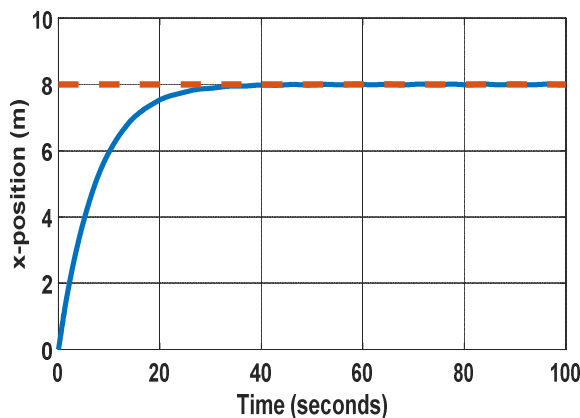
Hình 2. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 2

Kết quả mô phỏng hình 1, 2 khi sử dụng bộ điều khiển Backstepping cho thấy:

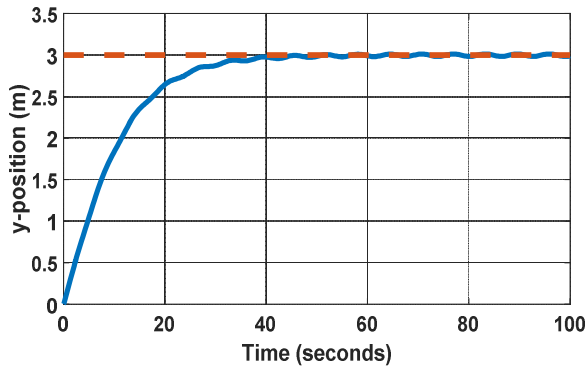
- Thời gian xác lập nhanh với các vị trí theo phương Ox, Oy, Oz và góc điều hướng tương ứng với trường hợp 1 và trường hợp 2 lần lượt là: 21s, 30s, 16s, 20s và 20s, 24s, 17s, 30s.

- Gần như không có độ quá điều chỉnh trong kết quả mô phỏng các trạng thái chuyển động của thiết bị AUV.

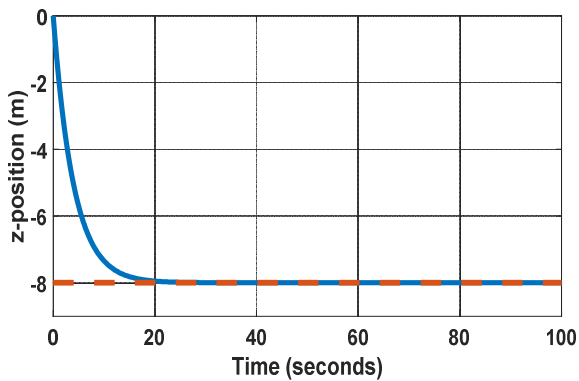
Trường hợp 3: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -8 (m) tính từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như sau: $\eta_{1d} = [8 \ 3]^T$ và $\eta_{2d} = [-8 \ 0]^T$. Tuy nhiên thiết bị chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng: $\Delta = [20\sin(0,01t) \ 10\cos(0,01t)]^T$



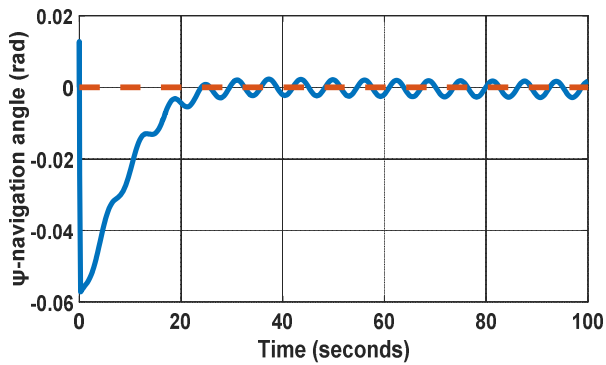
(a) Vị trí theo phương Ox



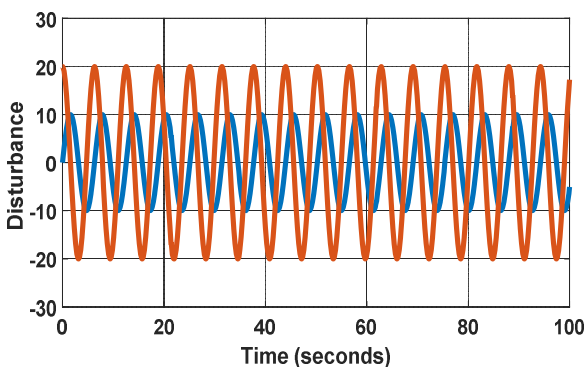
(b) Vị trí theo phương Oy



(c) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV

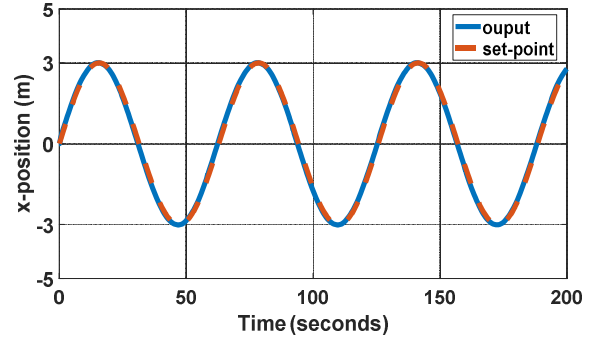


(e) Nhiễu tác động

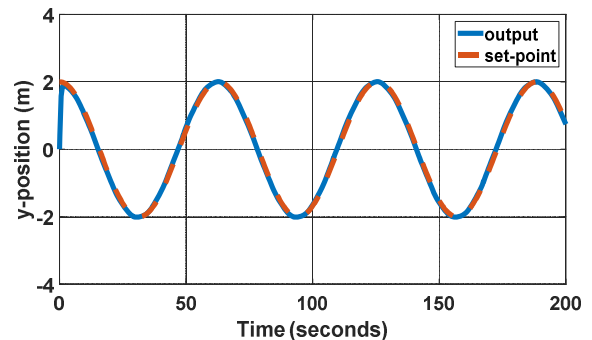
Hình 3. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trong trường hợp 3

Trường hợp 4: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -4 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian

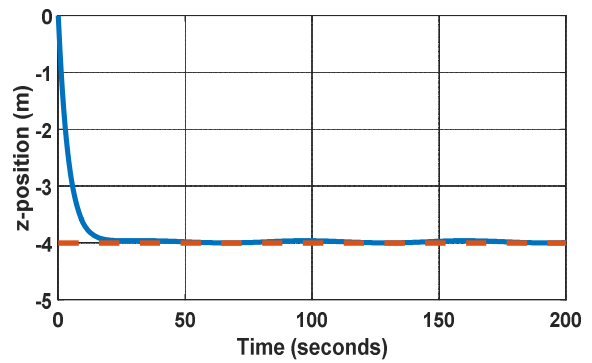
với các giá trị đặt như sau: $\eta_{1d} = [3 \sin(0,01t) \ 5 \cos(0,01t)]^T$ và $\eta_{2d} = [-4 \ 0]^T$. Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng: $\Delta = [20 \sin(0,01t) \ 10 \cos(0,01t)]^T$



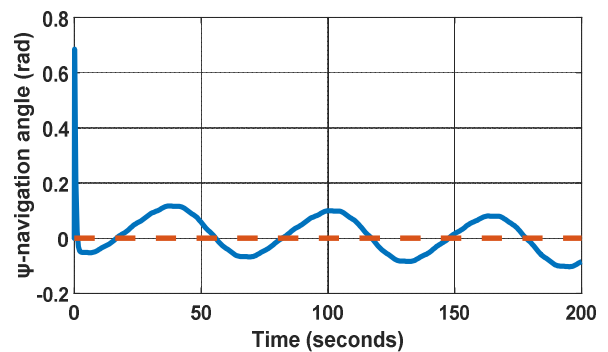
(a) Vị trí theo phương Ox



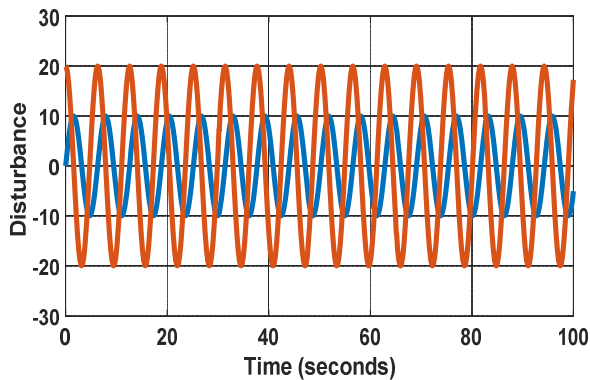
(b) Vị trí theo phương Oy



(c) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV



(e) Nhiều tác động

Hình 4. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trong trường hợp 4

Kết quả mô phỏng hình 3, 4 cho thấy, bộ điều khiển Backstepping cho chất lượng tốt cả khi có nhiễu điều khiển tác động lên thiết bị AUV. Cụ thể, với quỹ đạo đặt là hằng số và hàm điều hòa theo thời gian thì thiết bị đều đáp ứng tốt và ít rung lắc, thời gian xác lập nhỏ. Tuy nhiên, góc điều hướng trong hình 3d và 4d tuy có sai lệch tĩnh hơi lớn nhưng có thể chấp nhận được do vẫn nằm trong hành lang xác lập cho phép. Quá điều chỉnh nhỏ và có thể coi như bằng không do nhỏ hơn 10^{-5} . Bên cạnh đó, bộ điều khiển Backstepping cho chất lượng đáp ứng vị trí và độ sâu của thiết bị AUV tốt.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất bộ điều khiển Backstepping đảm bảo hệ thống ổn định bám vị trí theo phương O_x , O_y , O_z ; giảm thiểu biên độ góc điều hướng và sai lệch tiến về 0. Trong các trường hợp giá trị đặt khác nhau và có nhiễu ngoài tác động, bộ điều khiển Backstepping đều cho chất lượng tốt. Kết quả mô phỏng đã khẳng định được những ưu điểm của bộ điều khiển được đề xuất.

Trong thời gian tới nhóm nghiên cứu sẽ kết hợp các bộ điều khiển thông minh để tối ưu hơn nữa thuật toán điều khiển nhằm đem lại hiệu quả cao trong việc điều khiển mô hình AUV mà nhóm nghiên cứu đã xây dựng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyen D., 2015. *Analysis of hydrodynamics and control system design of object-oriented technology for autonomous underwater vehicles*. Doctoral Thesis Hanoi University of Science and Technology.
- [2]. Nguyen N. H., 2017. *Research on the Object-Oriented method for Analyzing and Designing AUV/ASV controllers with SysML/Modelica and Hybrid Automata*. Doctoral Thesis Hanoi University of Science and Technology.
- [3]. Broome D., Lambert T., 1978. *An optimising function for adaptive ship's autopilots*. presented at the Fifth Ship Control Symposium, Bethesda.
- [4]. Clarke D., 1980. *Development of a cost function for autopilot design*. presented at the Ship steering and Automatic Control, Genoa.
- [5]. Katebi M., Byrne J., 1988. *LQG adaptive ship autopilot*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 10, pp. 187-197.

- [6]. Sanner R. M., Slotine J. J. E., 1991. *Direct adaptive control using Gaussian networks*. Nonlinear Systems Lab., MIT, Tech. Rep. SL-910303.
- [7]. Yeşildirek A., Lewis F. L., 1995. *Feedback linearization using neural networks*. Automatica, vol. 31, pp. 1659-1664.
- [8]. Zhang Y., Peng P. Y., Jiang Z. P., 2000. *Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using Backstepping*. IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 11, pp. 1347-1360.
- [9]. Honderd G., Winkelman J., 1972. *An adaptive autopilot for ships*. in Third Ship Control Systems Symposium, Ministry of Defence.
- [10]. Van Amerongen J., 1984. *Adaptive steering of ships - A model reference approach*. Automatica, vol. 20, pp. 3-14.
- [11]. Fossen T. I., Paulsen M. J., 1992. *Adaptive feedback linearization applied to steering of ships*. First IEEE Conference on Control Applications, pp. 1088-1093.
- [12]. Ge S. S., Hang C. C., Lee T. H., Zhang T., 2013. *Stable adaptive neural network control*. Springer Science & Business Media.
- [13]. Gupta M. M., Rao D. H., Council I. N. N., 1994. *Neuro-control Systems: Theory and Applications*. IEEE Press.
- [14]. Kurdila A., Narcowich F. J., Ward J. D., 1995. *Persistency of excitation in identification using radial basis function approximants*. SIAM journal on control and optimization, vol. 33, pp. 625-642.
- [15]. Nguyen V. T., Dinh V. P., Nguyen C. H., 2021. *Thiet bi lan tu hanh duoi nuoc co canh thu nang luong mat troi linh hoạt*. Patent, Intellectual Property Office of Viet Nam.

AUTHORS INFORMATION

**Vu Van Quang¹, Dinh Anh Tuan¹, Le Xuan Hai², Kim Dinh Thai²,
Tran Viet Hoang³, Nguyen Anh Duc³**

¹Faculty of Electrical - Electronic Engineering, Vietnam Maritime University)

²HaUI Institute of Technology, Hanoi University of Industry

³School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology