

**BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM**



**VŨ VĂN QUANG**

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU  
KHIỂN BÁM QUỠ ĐẠO CỦA PHƯƠNG TIỆN  
CHUYỂN ĐỘNG NGẦM**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HẢI PHÒNG - 2024**

BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM

VŨ VĂN QUANG

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU  
KHIỂN BÁM QUỠ ĐẠO CỦA PHƯƠNG TIỆN  
CHUYỂN ĐỘNG NGẦM

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

MÃ SỐ: 9520216

CHUYÊN NGÀNH: TỰ ĐỘNG HÓA

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TS Đinh Anh Tuấn

2. PGS.TS Phạm Ngọc Tiệp

HẢI PHÒNG - 2024

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là nghiên cứu của cá nhân tôi dưới sự hướng dẫn của tập thể giảng viên hướng dẫn và các nhà khoa học. Các tài liệu tham khảo trong luận án được trích dẫn đầy đủ. Các kết quả nghiên cứu trung thực và chưa từng được tác giả khác công bố trên bất cứ công bố khoa học nào.

*Hải Phòng, ngày      tháng 01 năm 2024*

**Giáo viên hướng dẫn**

**Giáo viên hướng dẫn**

**Tác giả**

***PGS.TS Đinh Anh Tuấn***

***PGS.TS Phạm Ngọc Tiếp***

***Vũ Văn Quang***

## LỜI CẢM ƠN

Trong suốt quá trình hoàn thành luận án, tôi nhận được nhiều góp ý nhiệt tình của các giáo sư, tiến sĩ, các nhà khoa học uy tín và các bạn đồng nghiệp có chuyên môn. Tôi xin được gửi tới họ lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất.

Tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn đến tập thể hướng dẫn PGS.TS. Đinh Anh Tuấn và PGS.TS. Phạm Ngọc Tiếp đã trực tiếp bằng tâm huyết giúp đỡ tôi trong suốt thời gian qua. Cảm ơn tập thể giảng viên bộ môn Tự động hóa hệ thống điện, Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi trong quá trình học tập và nghiên cứu thực hiện luận án.

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đến các anh chị em đồng nghiệp tại bộ môn Điện, Khoa Điện – Cơ, đặc biệt là Ban giám hiệu Trường Đại học Hải Phòng nơi tôi đang công tác chuyên môn đã tạo mọi điều kiện thuận lợi để tôi được yên tâm học tập, nghiên cứu.

Sau cùng tôi xin gửi lời cảm ơn đến những người thân trong gia đình đã luôn bên tôi giúp tôi có thời gian và điều kiện tốt nhất để hoàn thành nhiệm vụ học tập.

*Hải Phòng, ngày      tháng 01 năm 2024*

**Tác giả luận án**

***Vũ Văn Quang***

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

|                                  |                                                                       |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $X, Y, Z$                        | Lực tác dụng lên AUV ( $N$ )                                          |
| $K, M, N$                        | Mô men tác dụng lên AUV ( $Nm$ )                                      |
| $u, v, w$                        | Tham số vận tốc chiếu lên các trục của hệ tọa độ gắn liền ( $m/s$ )   |
| $u_c, v_c, w_c$                  | Các thành phần vận tốc dòng chảy đối với hệ tọa độ gắn liền ( $m/s$ ) |
| $p, q, r$                        | Các thành phần vận tốc góc chiếu lên hệ tọa độ gắn liền ( $rad/s$ )   |
| $x, y, z$                        | Vị trí của AUV trong hệ tọa độ địa lý ( $m$ )                         |
| $\gamma, \delta, \psi$           | Biểu diễn ba góc Ole ( $rad$ )                                        |
| $X_u$                            | Hệ số lực khối nước kèm ( $kg$ )                                      |
| $X_{wq}, X_{qq}, X_{vr}, X_{rr}$ | Hệ số lực khối nước kèm chéo trục ( $kg/rad$ )                        |
| $X_{u u }, X_{uv}, X_{uw}$       | Hệ số lực cản theo trục $X_b$ của hệ tọa độ gắn liền ( $kg/m$ )       |
| $X_{w w }, X_{uv}, X_{uw}$       | Hệ số lực cản theo trục $X_b$ của hệ tọa độ gắn liền ( $kg/m$ )       |
| $X_{up}$                         | Hệ số lực bánh lái ( $kg/rad$ )                                       |
| $X_{uu\delta_l}$                 | Hệ số lực của bánh lái ( $kg/m.rad$ )                                 |
| $X_{pl}$                         | Lực đẩy động cơ ( $N$ )                                               |
| $Y_v, Y_r$                       | Hệ số lực khối nước kèm ( $kg$ )                                      |
| $Y_{v v }$                       | Hệ số lực cản ( $kg/m$ )                                              |
| $Y_{wp}, Y_{pq}$                 | Hệ số lực khối nước kèm chéo trục $Y_b$ ( $kg/rad$ )                  |
| $Y_{uv}$                         | Hệ số khối nước kèm chéo trục, lực nâng và lực cản ( $kg/rad$ )       |
| $Y_{ur}$                         | Hệ số khối nước kèm chéo trục, lực nâng ( $kg/rad$ )                  |
| $Y_{uu\delta_h}$                 | Hệ số lực của bánh lái ( $kg/m.rad$ )                                 |
| $Z_w, Z_q$                       | Hệ số lực khối nước kèm ( $kg$ )                                      |
| $Z_{w w }$                       | Hệ số lực cản ( $kg/m$ )                                              |
| $Z_{uq}$                         | Hệ số khối nước kèm chéo trục và lực nâng ( $kg/rad$ )                |
| $Z_{vp}, Z_{rp}$                 | Hệ số lực khối nước kèm chéo trục ( $kg/rad$ )                        |
| $Z_{uw}$                         | Hệ số lực khối nước kèm chéo trục, lực nâng và lực cản ( $kg/rad$ )   |
| $Z_{uu\delta_s}$                 | Hệ số lực của bánh lái ( $kg/m.rad$ )                                 |
| $K_p$                            | Hệ số mô men khối nước kèm ( $kg.m^2/rad^2$ )                         |

|                            |                                                                 |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $K_{uu\delta_l}$           | Hệ số mô men bánh lái đối với hệ tọa độ gắn liền ( $kg/rad$ )   |
| $K_{uu}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm ( $kg/rad$ )                         |
| $K_{up}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục ( $kg/rad$ )               |
| $M_{\dot{q}}, M_{\dot{w}}$ | Hệ số mô men khối nước kèm ( $kg.m^2/rad^2$ )                   |
| $M_{uw}$                   | Hệ số mô men thân và thành phần bánh lái ( $kg$ )               |
| $M_{rp}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục ( $kg.m^2/rad^2$ )         |
| $M_{up}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục và lực nâng ( $kg.m/rad$ ) |
| $M_{vp}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục ( $kg.m/rad$ )             |
| $M_{uu\delta_s}$           | Hệ số mô men bánh lái ( $kg/rad$ )                              |
| $N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}$ | Hệ số mô men khối nước kèm ( $kg.m^2/rad^2$ )                   |
| $N_{ur}$                   | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục và lực nâng ( $kg.m/rad$ ) |
| $N_{uv}$                   | Hệ số mô men thân và bánh lái ( $kg$ )                          |
| $N_{wp}, N_{pq}$           | Hệ số mô men khối nước kèm chéo trục ( $kg.m/rad$ )             |
| $N_{uu\delta_h}$           | Hệ số mô men bánh lái ( $kg/rad$ )                              |
| $B$                        | Lực nổi (lực Acsimet) ( $N$ )                                   |
| $W$                        | Lực trọng lực ( $N$ )                                           |
| $D$                        | Lực cản ( $N$ )                                                 |
| $L$                        | Lực nâng ( $N$ )                                                |
| $\rho$                     | Mật độ nước ( $kg/m^3$ )                                        |
| $A_f$                      | Tổng diện tích bề mặt theo hướng vận tốc AUV ( $m^2$ )          |
| $\alpha, \beta$            | Các góc tấn công và góc trượt ngang của AUV ( $rad$ )           |
| $S_{bl}$                   | Diện tích bề mặt của bánh lái ( $m^2$ )                         |
| $\delta_e$                 | Góc ảnh hưởng của bánh lái ( $rad$ )                            |
| $x_{bl}$                   | Khoảng cách từ trục của các bánh lái đến tâm trọng lực ( $m$ )  |
| $\delta_{h1}, \delta_{h2}$ | Góc quay các bánh lái hướng ( $rad$ )                           |
| $\delta_{s1}, \delta_{s2}$ | Góc quay các bánh lái sâu ( $rad$ )                             |
| $\delta_h$                 | Tổng góc bề lái điều khiển theo góc hướng ( $rad$ )             |
| $\delta_l$                 | Tổng góc bề lái điều khiển theo góc lắc ( $rad$ )               |
| $\delta_s$                 | Tổng góc bề lái điều khiển theo góc chúc ngóc ( $rad$ )         |
| $M_{RB}$                   | Ma trận quán tính của AUV                                       |

|                                              |                                                                |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $C_{RB}$                                     | Ma trận hướng tâm Coriolis của AUV                             |
| $\underline{\tau}_{RB}$                      | Ngoại lực và mô men ngoại lực tác động lên AUV                 |
| $G_B$                                        | Tâm khối của AUV trong $OX_bY_bZ_b$                            |
| $I_0$                                        | Ma trận mô men đường chéo                                      |
| $M_A$                                        | Ma trận quán tính khối nước kèm                                |
| $C_A(\nu)$                                   | Ma trận hướng tâm Coriolis khối nước kèm                       |
| $D(\nu)$                                     | Ma trận lực và mô men thủy động                                |
| $g(\underline{\eta})$                        | Biểu diễn lực và mô men trọng lực                              |
| $L(\nu)$                                     | Ma trận thông số lực và mô men của bánh lái                    |
| $\underline{\tau}_{bl}$                      | Véc tơ lực và mô men của bánh lái                              |
| $\underline{\tau}_{pl}$                      | Véc tơ lực và mô men của động cơ đẩy                           |
| $C_f$                                        | Biểu diễn tâm nổi của phương tiện ngầm tự hành AUV             |
| $R_\mu, R_l$                                 | Bán kính cong của trái đất theo tham chiếu Ellip               |
| $R$                                          | Bán kính của trái đất khi xem trái đất là hình cầu             |
| $\underline{V}$                              | Véc tơ vận tốc dài trong hệ tọa độ gắn liền                    |
| $\underline{\omega}$                         | Véc tơ vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn liền                    |
| $\underline{U}$                              | Véc tơ vận tốc góc trái đất                                    |
| $l, \mu$                                     | Đại lượng biểu diễn kinh độ, vĩ độ                             |
| $\Lambda$                                    | Số siêu phức quaternion                                        |
| $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ | Biểu diễn các tham số Rodrig – Hamilton                        |
| $C_b^n$                                      | Ma trận chuyển từ hệ tọa độ gắn liền sang hệ tọa độ địa lý     |
| $C_d^n$                                      | Ma trận chuyển từ hệ tọa độ đế sang hệ tọa độ địa lý           |
| $a_x, a_y, a_z$                              | Chỉ số gia tốc cảm nhận có nhiều đo đối với hệ tọa độ gắn liền |
| $a_{bx}, a_{by}, a_{bz}$                     | Chỉ số gia tốc cảm nhận đối với hệ tọa độ gắn liền             |
| $w_4, w_5, w_6$                              | Nhiều đo của gia tốc kế                                        |
| $B_x, B_y, B_z$                              | Ba chỉ số của từ kế trong $OX_bY_bZ_b$                         |
| $V_x^{DVL}, V_y^{DVL}, V_z^{DVL}$            | Ba chỉ số của từ kế trong $OX_0Y_0Z_0$                         |
| $V_N, V_E, V_D$                              | Biểu diễn ba chỉ số vận tốc trong $OX_0Y_0Z_0$                 |
| $\underline{\varphi}(t)$                     | Véc tơ hồi quy                                                 |

|                             |                                                                      |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $\varepsilon(t)$            | Biểu diễn ước lượng sai số                                           |
| $\sigma$                    | Biểu diễn hệ số quên                                                 |
| $\underline{\theta}_k$      | Trọng số của mạng singleton                                          |
| $\hat{e}_k$                 | Biểu diễn trạng thái ước lượng sai số                                |
| $A_{k1}^i, A_{k2}^i, B_k^i$ | Ma trận biểu diễn các tập mờ                                         |
| $OX^I Y^I Z^I$              | Hệ tọa độ quán tính                                                  |
| $OX^e Y^e Z^e$              | Hệ tọa độ cố định tâm trái đất                                       |
| $OX_b Y_b Z_b$              | Hệ tọa độ gắn liền                                                   |
| $OX_0 Y_0 Z_0$              | Hệ tọa độ địa lý                                                     |
| $\phi$                      | Vị trí và góc Euler chuyển động quay quanh trục x                    |
| $\theta$                    | Vị trí và góc Euler chuyển động quay quanh trục y                    |
| $\psi$                      | Vị trí và góc Euler chuyển động quay quanh trục z                    |
| $r_g$                       | Véc-tơ tọa độ của trọng tâm của vật rắn                              |
| $\eta_1$                    | Biểu diễn vị trí của tàu trong $OX^e Y^e Z^e$                        |
| $\eta_2$                    | Biểu diễn góc hướng của tàu trong $OX^e Y^e Z^e$                     |
| $\eta$                      | Biểu diễn vị trí và góc hướng của tàu trong $OX^e Y^e Z^e$           |
| $v_1$                       | Biểu diễn vận tốc dài trong $OX_b Y_b Z_b$                           |
| $v_2$                       | Biểu diễn vận tốc góc trong $OX_b Y_b Z_b$                           |
| $v$                         | Biểu diễn vận tốc góc và vận tốc dài trong $OX_b Y_b Z_b$            |
| $\tau_1$                    | Thành phần lực tác động trong $OX_b Y_b Z_b$                         |
| $\tau_2$                    | Thành phần góc hướng của phương tiện ngầm trong $OX^e Y^e Z^e$       |
| $\tau$                      | Thành phần lực và tác động lên phương tiện ngầm trong $OX^e Y^e Z^e$ |
| $w$                         | Biểu diễn lực và mô men nhiễu loạn môi trường                        |
| $\tau_D$                    | Biểu diễn lực và mô men suy giảm                                     |
| $\tau_H$                    | Biểu diễn lực và cảm ứng tác động lên phương tiện ngầm               |

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

| Ký hiệu | Tiếng Anh                                                 | Tiếng Việt                                                        |
|---------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| AUV     | Autonomous Underwater Vehicle                             | Phương tiện ngầm tự hành                                          |
| ROV     | Remotely Operated Vehicle                                 | Phương tiện ngầm điều khiển từ xa                                 |
| TUV     | Tetherless underwater vehicle                             | Phương tiện dưới nước                                             |
| QUV     | Quadrotor Underwater Vehicle                              | Phương tiện Quadrotor                                             |
| UAV     | Unmanned Aerial Vehicle                                   | Phương tiện bay không người lái                                   |
| ASWs    | Anti Submarine Weapons                                    | Các loại vũ khí chống ngầm                                        |
| ANB     | Adaptive neural network backstepping                      | Thích nghi nơ-ron backstepping                                    |
| ANSB    | Adaptive neural network sliding mode backstepping         | Thích nghi nơ-ron trượt backstepping                              |
| ANSBC   | Adaptive neural network sliding mode backstepping control | Điều khiển thích nghi nơ-ron trượt backstepping nơ-ron            |
| BODY    | Body-fixed reference frame                                | Khung tọa độ quy chiếu gắn thân                                   |
| CG      | Center of gravity                                         | Trọng tâm                                                         |
| CB      | Center of buoyancy                                        | Tâm nổi                                                           |
| ECI     | The Earth-centered inertial frame                         | Khung tọa độ quán tính gốc trùng tâm trái đất.                    |
| ECEF    | Earth-centered Earth-fixed reference frame                | Khung tọa độ tham chiếu có gốc trùng tâm trái đất.                |
| GPS     | Global Positioning System                                 | Hệ thống định vị toàn cầu                                         |
| INS     | Inertial Navigation System                                | Hệ thống dẫn đường quán tính                                      |
| IFAC    | International Federation of Automatic Control             | Hiệp hội quốc tế về tự động hóa                                   |
| ISS     | Input-to-state stable                                     | Ổn định trạng thái đầu vào                                        |
| LTĐTT   | Autopilot of ship                                         | Lái tự động tàu thủy                                              |
| LQR     | Linear quadratic regulator                                | Bộ điều khiển tối ưu toàn phương                                  |
| LQG     | Linear quadratic Gaussian                                 | Bộ điều khiển tối ưu toàn phương kháng nhiễu                      |
| MIMO    | Multiple Inputs, Multiple Outputs                         | Nhiều đầu vào, nhiều đầu ra                                       |
| MNN     | Multiple layer neural networks                            | Mạng nơ-ron nhiều lớp                                             |
| NED     | North-East-Down                                           | Hệ tọa độ có các trục hướng bắc – hướng đông – hướng tâm trái đất |
| PE      | Persistent excitation                                     | Kích thích bền (liên tục)                                         |
| RBF     | Radial basis function                                     | Hàm hướng tâm                                                     |
| RIF     | Radiation-Induced Forces                                  | Lực cảm biến bức xạ                                               |
| SISO    | Single Input and Single Output                            | Một đầu vào, một đầu ra                                           |

|        |                                                        |                                            |
|--------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| SMC    | Sliding mode control                                   | Điều khiển trượt                           |
| SMB    | Sliding mode backstepping                              | Trượt Backstepping                         |
| HSMC   | Hierarchical Sliding Mode Controller                   | Bộ điều khiển trượt tầng                   |
| ANHSMC | Adaptive Nơ – ron Hierarchical Sliding Mode Controller | Bộ điều khiển thích nghi nơ-ron trượt tầng |
| AFB    | Adaptive Fuzzy Backstepping                            | Bộ điều khiển thích nghi Backstepping      |
| DOF    | Degrees Of Freedom                                     | Bậc tự do                                  |
| SNAME  | Society of Naval Architects and Marine Engineers       | Hiệp hội kiến trúc hải quân và hàng hải    |
| UMS    | Underactuated mechanical systems                       | Hệ thiếu cơ cấu chấp hành                  |

## MỤC LỤC

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| LỜI CAM ĐOAN .....                                                    | i   |
| LỜI CẢM ƠN .....                                                      | ii  |
| DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....                                    | iii |
| DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT .....                            | vii |
| MỤC LỤC .....                                                         | ix  |
| DANH MỤC CÁC BẢNG.....                                                | xii |
| MỞ ĐẦU .....                                                          | 1   |
| 1. Tính cấp thiết của đề tài luận án .....                            | 1   |
| 2. Mục đích nghiên cứu .....                                          | 3   |
| 3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài.....                    | 3   |
| 4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án.....                     | 4   |
| 5. Phương pháp nghiên cứu .....                                       | 4   |
| 6. Những đóng góp mới của luận án .....                               | 5   |
| 7. Bố cục của luận án .....                                           | 5   |
| Chương 1. TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG TIỆN CHUYỂN ĐỘNG NGẦM AUV ..            | 7   |
| 1.1. Tổng quan về phương tiện chuyển động ngầm.....                   | 7   |
| 1.2. Một số ứng dụng tiêu biểu của AUV .....                          | 11  |
| 1.3. Hệ tọa độ của thiết bị lặn tự hành AUV .....                     | 16  |
| 1.4. Mô tả động học phương tiện chuyển động ngầm.....                 | 19  |
| 1.5. Các lực và mô men ngoại lực tác động lên AUV .....               | 25  |
| 1.5.1. Các lực và mô men gây ra bởi trọng lực và lực nổi.....         | 26  |
| 1.5.2. Các lực và khối nước kèm.....                                  | 26  |
| 1.5.3. Các lực và mô men thủy động.....                               | 28  |
| 1.5.4. Các lực và mô men của bánh lái .....                           | 30  |
| 1.6. Các yếu tố môi trường tác động lên phương tiện ngầm tự hành..... | 31  |
| 1.7. Tình hình nghiên cứu AUV trên thế giới.....                      | 35  |
| 1.8. Những nghiên cứu AUV trong nước .....                            | 43  |
| Kết luận chương 1 .....                                               | 46  |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Chương 2. ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING THÍCH NGHI MỜ ĐẢM BẢO BẮM QUỸ ĐẠO CHO AUV 4 DOF THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH .....        | 47  |
| 2.1. Mô hình toán của AUV .....                                                                                       | 48  |
| 2.1.1. Mô hình toán AUV 6 DOF (Dynamics) .....                                                                        | 48  |
| 2.1.2. Mô hình toán AUV 4 DOF hệ thiếu cơ cấu chấp hành .....                                                         | 52  |
| 2.2. Cơ sở lý thuyết điều khiển Backstepping thích nghi mờ .....                                                      | 57  |
| 2.2.1. Kỹ thuật điều khiển Backstepping .....                                                                         | 57  |
| 2.2.2. Điều khiển dựa trên hệ suy diễn mờ .....                                                                       | 61  |
| 2.3. Điều khiển Backstepping cho AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành.....                                                | 64  |
| 2.3.1. Tổng hợp bộ điều khiển cho AUV bằng kỹ thuật Backstepping .....                                                | 64  |
| 2.3.2. Phân tích mô hình mô phỏng điều khiển Backstepping cho AUV 4 DOF.....                                          | 67  |
| 2.4. Phân tích mô hình mô phỏng bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ (AFB) ....                                   | 72  |
| 2.4.1. Tổng hợp bộ điều khiển cho AUV bằng kỹ thuật Backstepping thích nghi mờ.....                                   | 72  |
| 2.4.2. Mô hình mô phỏng hệ điều khiển Backstepping thích nghi mờ .....                                                | 74  |
| 2.5. So sánh kết quả mô phỏng bộ điều khiển Backstepping với Backstepping thích nghi mờ (AFB) .....                   | 77  |
| Kết luận chương 2 .....                                                                                               | 86  |
| Chương 3. ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TẦNG THÍCH NGHI NƠ RON NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN CHO AUV THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH ..... | 87  |
| 3.1. Bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) .....                                                                            | 88  |
| 3.2. Mạng nơ-ron nhân tạo .....                                                                                       | 94  |
| 3.3. Thiết kế bộ điều khiển HSMC cho thiết bị lặn tự hành AUV.....                                                    | 97  |
| 3.3.1. Tổng hợp bộ điều khiển trượt tầng HSMC cho AUV 4 DOF.....                                                      | 97  |
| 3.3.2. Mô hình mô phỏng AUV 4 DOF điều khiển trượt tầng HSMC .....                                                    | 100 |
| 3.4. Bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) thích nghi Nơ ron cho AUV .....                                                  | 105 |
| 3.4.1. Tổng hợp bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) thích nghi Nơ ron cho AUV. ....                                       | 106 |
| 3.4.2. Phân tích kết quả mô phỏng .....                                                                               | 112 |
| 3.5. So sánh kết quả mô phỏng bộ điều khiển HSMC với thích nghi Nơ-ron HSMC (ANHSMC) .....                            | 117 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| Kết luận chương 3 .....               | 122 |
| KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ .....           | 124 |
| NHỮNG CÔNG TRÌNH ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ..... | 126 |
| TÀI LIỆU THAM KHẢO .....              | 127 |
| PHỤ LỤC 1                             |     |
| PHỤ LỤC 2                             |     |

## DANH MỤC CÁC BẢNG

| Số bảng | Tên bảng                                                   | Trang |
|---------|------------------------------------------------------------|-------|
| 1.1     | Hình ảnh về một số AUV gần đây nhất trên thế giới          | 13    |
| 1.2     | Dữ liệu thống kê và dự báo về phát triển AUV trên thế giới | 15    |
| 1.3     | Các ký hiệu của SNAME                                      | 16    |
| 2.1     | Hệ luật suy diễn theo phương pháp tuyến tính               | 63    |
| 2.2     | Tham số mô hình thiết bị AUV [17]                          | 68    |
| 2.3     | Tham số bộ điều khiển Backstepping                         | 68    |
| 2.4     | Hệ suy diễn cho bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ   | 74    |
| 2.5     | Tham số bộ điều khiển AFB                                  | 75    |
| 3.1     | Tham số bộ điều khiển HSMC                                 | 101   |
| 3.2     | Tham số bộ điều khiển ANHSMC                               | 113   |
| 3.3     | So sánh đặc tính bộ điều khiển HSMC và ANHSMC              | 122   |

## DANH MỤC CÁC HÌNH

| Số hình | Tên hình                                                                  | Trang |
|---------|---------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1.1     | Phân loại phương tiện chuyển động ngầm [1]                                | 8     |
| 1.2     | Phương tiện chuyển động ngầm có người lái                                 | 9     |
| 1.3     | Phương tiện ngầm điều khiển từ xa                                         | 10    |
| 1.4     | Phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV                                  | 11    |
| 1.5     | Tình hình công bố khoa học về AUV theo châu lục [1]                       | 12    |
| 1.6     | Biểu diễn hệ tọa độ của AUV [9]                                           | 16    |
| 1.7     | Quan hệ của hệ tọa độ địa lý và hệ tọa độ cố định tâm trái đất [9]        | 17    |
| 1.8     | Hệ tọa độ gắn thân [9]                                                    | 18    |
| 1.9     | Biểu diễn lực nâng, lực cản, góc tấn góc nâng của AUV                     | 28    |
| 1.10    | Góc bẻ lái, bánh lái sâu và bánh lái hướng [9]                            | 30    |
| 1.11    | Góc tới và góc dạt [10]                                                   | 32    |
| 1.12    | TUV điều khiển theo tín hiệu thu phát [14]                                | 38    |
| 1.13    | Hệ tọa độ mô tả chuyển động của TUV [14]                                  | 38    |
| 1.14    | T. I. Fossen thống kê các bộ điều khiển [16]                              | 39    |
| 1.15    | Cấu hình của AUV quadrotor [29]                                           | 42    |
| 1.16    | Quỹ đạo chuyển động của ASWs khi thả từ máy bay [9]                       | 45    |
| 2.1     | Phân tích lực AUV 4 DOF trong không gian 3 chiều                          | 53    |
| 2.2     | Phân tích lực AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành                            | 54    |
| 2.3     | Tập mờ của hai biến ngôn ngữ đầu vào $X_1$ và $X_2$                       | 63    |
| 2.4     | Tên các hằng số đầu ra                                                    | 63    |
| 2.5     | Cấu trúc hệ thống điều khiển Backstepping cho AUV                         | 64    |
| 2.6     | Sơ đồ mô phỏng điều khiển backstepping cho AUV 4 DOF trên Matlab simulink | 67    |
| 2.7     | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 1 Backstepping                | 69    |
| 2.8     | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng, nhiễu trường hợp 2 Backstepping           | 70    |
| 2.9a    | Vị trí theo trục x trường hợp 3 Backstepping                              | 71    |
| 2.9b    | Vị trí theo trục y trường hợp 3 Backstepping                              | 71    |
| 2.9c    | Vị trí theo trục z trường hợp 3 Backstepping                              | 71    |
| 2.10    | Mô hình hệ thống điều khiển Backstepping thích nghi mờ                    | 72    |
| 2.11    | Tập mờ của các biến ngôn ngữ đầu vào                                      | 73    |

|       |                                                                                            |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.12  | Sơ đồ khối Plant mô phỏng điều khiển backstepping Fuzzy cho AUV 4 DOF trên Matlab simulink | 74  |
| 2.13  | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 1 AFB                                    | 76  |
| 2.14  | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 2 AFB                                   | 77  |
| 2.15a | Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1                    | 79  |
| 2.15b | Đáp ứng theo trục y của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1                    | 80  |
| 2.15c | Đáp ứng góc điều hướng của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1                 | 80  |
| 2.15d | Đáp ứng theo trục z của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1                    | 80  |
| 2.15e | Quỹ đạo theo trục x, y của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1                 | 81  |
| 2.16a | Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2                    | 82  |
| 2.16b | Đáp ứng theo trục y của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2                    | 82  |
| 2.16c | Đáp ứng theo trục z của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2                    | 82  |
| 2.16d | Quỹ đạo theo trục x, y của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2                 | 83  |
| 2.17a | Sai số so với tín hiệu đặt trục x của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                           | 83  |
| 2.17b | Sai số so với tín hiệu đặt trục y của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                           | 84  |
| 2.17c | Sai số so với tín hiệu đặt trục z của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                           | 84  |
| 2.17d | Sai số trung bình với tín hiệu đặt của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                          | 84  |
| 2.17e | Sai số trong không gian 3D của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                                  | 84  |
| 2.17f | Sai số trong không gian 2D của 2 bộ điều khiển BCS và AFB                                  | 85  |
| 3.1   | Cấu trúc của bộ điều khiển trượt tầng HSMC [62]                                            | 88  |
| 3.2   | Xấp xỉ hàm bất định bằng mạng RBF                                                          | 96  |
| 3.3   | Cấu trúc hệ thống điều khiển HSMC cho AUV                                                  | 98  |
| 3.4   | Sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt tầng HSMC trên Matlab simulink                             | 100 |
| 3.5   | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng HSMC                                                      | 102 |
| 3.6   | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 1                                        | 103 |

|       |                                                                          |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7   | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 2 HSMC                       | 103 |
| 3.8   | Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 3 HSMC                       | 104 |
| 3.9   | Cấu trúc bộ điều khiển HSMC thích nghi Nơ ron                            | 107 |
| 3.10  | Cấu trúc mạng Nơ – ron hướng tâm RBF                                     | 108 |
| 3.11  | Cấu trúc huấn luyện mạng Nơ ron                                          | 108 |
| 3.12  | Sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt tầng HSMC thích nghi Nơ ron              | 113 |
| 3.13  | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 1 ANHSMC              | 114 |
| 3.14  | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 2 ANHSMC              | 115 |
| 3.15  | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 3 ANHSMC              | 116 |
| 3.16  | Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 4 ANHSMC              | 117 |
| 3.17a | Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC           | 118 |
| 3.17b | Đáp ứng theo trục y của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC           | 118 |
| 3.17c | Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC           | 118 |
| 3.17d | Quỹ đạo theo trục x, y của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC        | 118 |
| 3.18a | Sai số so với tín hiệu đặt trục x của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC     | 119 |
| 3.18b | Sai số so với tín hiệu đặt trục y của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC     | 120 |
| 3.18c | Sai số so với tín hiệu đặt trục theta của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC | 120 |
| 3.18d | Sai số trung bình với tín hiệu đặt của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC    | 120 |
| 3.18e | Sai số trong không gian 3D của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC            | 121 |
| 3.18f | Sai số trong không gian 2D của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC            | 121 |
| 3.19  | AUV bám theo quỹ đạo của bộ điều khiển ANHSMC lặn sâu 8m                 | 123 |
| 3.20  | AUV bám theo quỹ đạo của bộ điều khiển ANHSMC lặn sâu 10m                | 123 |

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Trái đất có khoảng 70% bề mặt được bao phủ bởi nước, do vậy có rất nhiều khu vực vẫn chưa được con người khám phá. Việt Nam nằm trên bờ Biển Đông, có vùng biển rộng hơn một triệu km<sup>2</sup> (gấp hơn ba lần diện tích đất liền) với bờ biển dài hơn 3.200 km và hệ thống sông ngòi dày đặc, có ý nghĩa cực kỳ quan trọng đối với công việc phát triển đất nước, trong đó nổi bật là dầu khí, hải sản. Do vậy phương tiện chuyển động ngầm nói chung và AUV nói riêng rất cần thiết, hữu hiệu trong việc phục vụ các ngành công nghiệp như: Xây dựng công trình biển, khảo sát nghiên cứu biển, hải dương học, tìm kiếm cứu hộ, kinh tế biển và quốc phòng. Đặc biệt trong quân sự hiện nay AUV có thể được ví như UAV (thiết bị bay không người lái) trên mặt đất với tầm quan trọng được khẳng định trong rất nhiều công trình ứng dụng gần đây [1], [2].

Trong Nghị quyết số 36/ NQ-TW ban hành ngày 22 tháng 10 năm 2018 là hội nghị tổng kết 10 năm thực hiện nghị quyết số 09/NQ –TW về phát triển chiến lược biển tại Việt Nam. Ban Chấp hành trung ương đã khẳng định trong nội dung văn kiện về “Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045” [3]. Điều đó đã được cụ thể hóa trong các công trình biển trọng điểm như xây dựng công trình ngầm, kéo điện lưới ra đảo, quốc phòng an ninh. Trong đó thành lập các lữ đoàn chuyên trách có khả năng tác chiến độc lập cho Hải quân Việt Nam như Lữ đoàn tàu ngầm 189 [4], Lữ đoàn tàu ngầm diesel – điện lớp KILO 636 [5]. Điều này cho thấy tầm nhìn và sự chuẩn bị từ rất sớm cho những mục tiêu cụ thể của Đảng và Nhà nước về phát triển kinh tế biển tại Việt Nam gắn liền với bảo đảm Quốc phòng, an ninh.

Để cụ thể hóa những chính sách của Đảng và Nhà nước cùng với sự phát triển vượt bậc của khoa học kỹ thuật ngày nay, phương tiện ngầm ngày càng được quan tâm phát triển, nhất là phương tiện ngầm có người lái bên trong. Tuy nhiên phương tiện ngầm có người lái bên trong thường là những thiết bị quân sự cỡ lớn và có thể dẫn đến những rủi ro như vụ tai nạn tàu ngầm

Nanggala nặng 1300 tấn của Hải quân Indonesia năm 2021 làm chết 53 người và chìm ở độ sâu 850m không thể trục vớt và điều tra nguyên nhân [6]. Từ đó khẳng định sự cần thiết cũng như tầm quan trọng của thiết bị không có người lái bên trong vì mục đích an toàn cho tính mạng con người và giảm thiểu rủi ro ở mức thấp nhất. Phương tiện ngầm tự hành AUV có nhiều ưu điểm như không yêu cầu điều hành liên tục của con người và không chứa các hệ thống con để duy trì sự sống như hệ thống khí tuần hoàn, thức ăn, nước uống.... Điều này dẫn đến sự đơn giản hóa trong thiết kế, bảo trì, bảo dưỡng thường xuyên sẽ nhỏ hơn so với thiết bị ngầm có người lái bên trong. Do đó AUV là thiết bị ngầm tự hành được quan tâm phát triển trong ngành công nghệ hàng hải cho cả mục đích dân sự và quân sự [7], [9].

AUV (Autonomous Underwater Vehicles) là đối tượng hoạt động trong môi trường nước chịu tác động của các yếu tố không biết trước như gió, dòng chảy, mật độ không được tính toán chính xác, ngay cả đặc tính động học của đối tượng cũng biến đổi theo thời gian như nhiên liệu bị tiêu hao, trọng lượng tàu, vị trí trọng tâm tàu thay đổi. Do đó, các thuật toán điều khiển hiện đại đã được nghiên cứu cho AUV, nhằm nâng cao khả năng cập nhật sự biến thiên của các hệ số thủy động học và động học của AUV để đạt được chất lượng điều khiển mong muốn.

Để nghiên cứu các thuật toán điều khiển cho AUV thì điều khiển thông minh có những ưu điểm rất lớn, một là tận dụng được kiến thức chuyên gia trong điều khiển, hai là tính linh hoạt cao, có khả năng thay đổi để đáp ứng dần tốt hơn (khả năng tự học), ba là có thể không cần biết mô hình toán học của hệ thống ....Tuy nhiên những nhược điểm mà điều khiển thông minh mang lại cũng không phải ít như khó được bảo đảm bằng toán học, cấu trúc điều khiển phức tạp. Vì thế bộ điều khiển thông minh thường đi kèm với các bộ điều khiển phi tuyến để tạo thành các hệ Hybrid (hệ lai) để tận dụng những lợi thế của điều khiển phi tuyến và phát huy ưu điểm của bộ điều khiển thông minh [17], [18].

Bộ điều khiển phi tuyến phải sử dụng nhiều công sức vào việc xây dựng mô hình toán cho đối tượng, trong đó mô hình toán cho hầu hết các đối tượng tàu nổi và tàu ngầm được Fossen thống kê khá đầy đủ [16]. Trong đó Fossen

khuyến khích các độc giả tiếp tục nghiên cứu nhiều mô hình điều khiển nâng cao, làm sao cho mô hình điều khiển đơn giản, hiệu quả và đáp ứng được yêu cầu. Phương tiện chuyển động ngầm hiện nay chủ yếu được nghiên cứu với phương trình chuyển động 6 DOF [14], [16]. Các công trình về phương tiện chuyển động ngầm 4 DOF cho các phương tiện ngầm cỡ nhỏ chủ yếu hướng đến thuật toán điều khiển đủ cơ cấu chấp hành. Hệ thiếu cơ cấu chấp hành được nghiên cứu trong các hệ thống như tàu thủy, tàu ngầm, máy bay, tàu vũ trụ, robot với mục đích để giảm giá thành, giảm trọng lượng, giảm tiêu hao năng lượng tiêu thụ hoặc hệ thống có thiết bị chấp hành bị lỗi. Trên thực tế, khi giảm cơ cấu chấp hành thì việc phát triển kỹ thuật điều khiển càng cần thiết và khó khăn hơn so với các hệ đủ cơ cấu chấp hành. Các công trình nghiên cứu hệ thiếu cơ cấu chấp hành UMS (Underactuated mechanical systems) được nghiên cứu tập trung nhiều đến việc thiết kế thuật toán điều khiển cho các hệ UMS phi tuyến khi phải xét đến các yếu tố bất định, mô hình không chính xác, nhiễu tác động vào hệ thống.

Vì những lý do đó NCS lựa chọn đề tài “Nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của phương tiện chuyển động ngầm” làm đề tài nghiên cứu cho luận án tiến sĩ của mình, để từ đó đề xuất các thuật toán hiện đại nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo của AUV, hướng tới đáp ứng nhu cầu phát triển và hiện đại hóa thiết bị ngầm tự hành AUV hệ thiếu cơ cấu chấp hành trong nước và trên thế giới.

## **2. Mục đích nghiên cứu**

Áp dụng lý thuyết điều khiển hiện đại xây dựng bộ điều khiển mới nhằm nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho phương tiện chuyển động ngầm dạng AUV 4 DOF hệ thiếu cơ cấu chấp hành.

## **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của đề tài**

**Đối tượng nghiên cứu:** Hệ thống điều khiển của phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV 4 DOF bám được quỹ đạo mong muốn với sai số nhỏ nhất trong điều kiện mô hình động học của tàu có các thành phần bất định.

**Phạm vi nghiên cứu:** Trong luận án này NCS không đề cập nhiều đến vấn đề dẫn đường hay định vị do những vấn đề này đã được nhiều công trình

ngiên cứu trước đó và cho kết quả tốt. NCS chỉ sử dụng bám quỹ đạo theo hằng số và quỹ hàm điều hòa trong không gian cho các mô phỏng sau này.

NCS hướng tới nghiên cứu xây dựng các thuật toán điều khiển để cung cấp tín hiệu điều khiển tức thời là các tín hiệu lực và mô men cho phép AUV di chuyển theo quỹ đạo mong muốn có tính năng bám hướng và quỹ đạo trên mặt phẳng ngang. Việc sử dụng các tín hiệu điều khiển thông qua các cơ cấu truyền động khác nhau trên AUV, NCS chưa có điều kiện nghiên cứu trong nội dung luận án này.

#### **4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án**

Luận án nghiên cứu và xây dựng các kỹ thuật điều khiển thích nghi mới trên cơ sở điều khiển phi tuyến kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo và điều khiển mờ cho phương tiện ngầm tự hành AUV 4 DOF có mô hình bất định, chịu ảnh hưởng của nhiễu môi trường. Mở ra hướng nghiên cứu mới cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành thích nghi trượt tầng theo vec tơ (khác với trượt tầng từng biến độc lập) hay còn gọi là trượt tầng suy rộng.

Luận án đề xuất hai xu hướng điều khiển cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành ứng dụng cho đối tượng AUV một là đưa về dạng đủ cơ cấu chấp hành khi thiết kế bộ điều khiển cho các trạng thái đủ cơ cấu chấp hành, sau đó áp dụng tín hiệu điều khiển này cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành ban đầu (bộ điều khiển Backstepping và Backsepping Fuzzy), hai là thiết kế bộ điều khiển trực tiếp cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành (HSMC và HSMC nơ-ron).

Các giải thuật đề xuất đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng kỹ thuật số cho một mô hình tàu thực tế. Với kết quả mô phỏng khẳng định chất lượng bám quỹ đạo thỏa mãn các yêu cầu đặt trước.

#### **5. Phương pháp nghiên cứu**

Phân tích lý thuyết các công trình khoa học được công bố trong thời gian gần đây ở lĩnh vực điều khiển thích nghi phi tuyến. Phân tích các ưu nhược điểm của từng phương pháp để từ đó đề xuất hướng nghiên cứu và phát triển phương pháp điều khiển mới cho phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành.

Nghiên cứu tổng hợp kết hợp với so sánh để đưa ra các giải pháp kỹ thuật cho phương án nâng cao chất lượng điều khiển. Các giải thuật mới được đề xuất, phân tích tính ổn định dựa trên lý thuyết Lyapunov và khảo sát đánh giá thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab.

## **6. Những đóng góp mới của luận án**

Luận án đã lựa chọn mô hình phương tiện chuyển động ngầm AUV 4 bậc tự do hệ thiếu cơ cấu chấp hành với mục đích để đơn giản hóa trong quá trình điều khiển mà vẫn đảm bảo được yêu cầu nhiệm vụ đặt ra. Ví trí tọa độ  $(x, y, z)$ , hướng đi của AUV  $(\psi)$  là mô hình đối tượng ứng dụng kỹ thuật điều khiển hiện đại. Mở ra hướng nghiên cứu mới với những đóng góp được tóm tắt như sau:

Xây dựng được thuật toán điều khiển Backstepping và Backstepping thích nghi sử dụng hệ logic mờ để so sánh đánh giá chất lượng điều khiển cho AUV có thành phần bất định dạng hàm số. Các kỹ thuật điều khiển được kiểm chứng trên phần mềm chuyên dụng đảm bảo bám quỹ đạo cho AUV.

Xây dựng bộ điều khiển trượt tầng Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) thích nghi nơ-ron cho mô hình AUV bốn bậc tự do với hai tham số trọng số để tính gần đúng hàm chứa nhiều phân tử của ma trận bất định  $C, D$  [9]. Mạng nơ-ron hướng tâm hai lớp sẽ chuyển các thành phần bất định về dạng hàm và xấp xỉ tạo thành bộ điều khiển thích nghi nơ-ron trượt tầng (ANHSMC) trên cơ sở kết hợp điều khiển trượt tầng và mạng nơ-ron nhân tạo để nâng cao chất lượng điều khiển quỹ đạo AUV tối ưu nhất.

## **7. Bố cục của luận án**

- Luận án được chia thành 3 chương với nội dung chính được tóm tắt như sau:

### ***Chương 1: Tổng quan về phương tiện chuyển động ngầm AUV***

Giới thiệu về mô hình động lực học và phân tích các đặc điểm của phương tiện ngầm. Xác định đối tượng của luận án là phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV thiếu cơ cấu chấp hành. Nghiên cứu tổng quan các phương pháp điều khiển đã được công bố trong và ngoài nước, ưu nhược điểm của từng nhóm phương pháp, làm nền tảng để phát triển các giải thuật điều khiển mới được đề xuất trong luận án.

## ***Chương 2: Điều khiển backstepping thích nghi mờ đảm bảo bám quỹ đạo cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành***

Xây dựng bộ điều khiển Backstepping cho đối tượng AUV (Autonomous Underwater) thiếu cơ cấu chấp hành và bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài không biết trước như dòng chảy, mật độ dòng chảy, lưu lượng nước. So sánh với bộ điều khiển Backstepping thích nghi sử dụng hệ logic mờ để chỉnh định tham số của bộ điều khiển. Từ đó khẳng định ưu điểm của bộ điều khiển kép Adaptive Fuzzy Backstepping (AFB) về độ bền vững với nhiễu và thời gian quá độ giảm.

## ***Chương 3: Điều khiển trượt tầng thích nghi nơ ron cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo.***

Trình bày lý thuyết về kỹ thuật về điều khiển trượt tầng Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC), và mạng nơ-ron nhân tạo làm nền tảng để phát triển bộ điều khiển thích nghi nơ-ron trượt tầng được đề xuất trên cơ sở kết hợp điều khiển trượt tầng và mạng nơ-ron nhân tạo. Hệ thống kín với ANHSMC được mô phỏng kiểm chứng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

## Chương 1.

### TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG TIỆN CHUYỂN ĐỘNG NGẦM AUV

#### 1.1. Tổng quan về phương tiện chuyển động ngầm

Phương tiện chuyển động ngầm nói chung là phương tiện hoạt động dưới nước được sử dụng trong rất nhiều lĩnh vực như quân sự, vận chuyển hàng hóa, nghiên cứu khoa học hàng hải và đang phát triển trong ngành du lịch. Phương tiện chuyển động ngầm có thể được sử dụng trong môi trường độc hại và lặn được đến độ sâu mà con người không đạt tới. Phương tiện chuyển động ngầm hoạt động dựa trên 2 định luật vật lý cơ bản:

Định luật Ac-Si-Mét phát biểu như sau: Với bất kỳ một vật nào chìm trong nước đều chịu một lực đẩy hướng lên trên, thẳng đứng và có độ lớn đúng bằng phần chất lỏng mà vật đang chiếm chỗ. Độ lớn của lực đẩy Ác-si-mét được tính bằng tích của trọng lượng riêng chất lỏng kí hiệu là  $d$  và thể tích bị vật chiếm chỗ kí hiệu là  $V$ :

$$F_A = d.V \quad (1.1)$$

Định luật Pascal phát biểu như sau: Áp suất chất lỏng do ngoại lực tác dụng lên mặt thoáng được truyền nguyên vẹn tới mọi điểm trong lòng chất lỏng. Nghĩa là áp suất tại điểm đó phân bố theo mọi phương có độ lớn bằng nhau.

Như vậy sẽ có 3 trường hợp xảy ra khi tiến hành thả một vật rắn ở trong lòng chất lỏng và vật rắn sẽ nổi khi trọng lượng riêng tổng hợp của vật nhỏ hơn trọng lượng riêng của nước ( $\rho$ ).

$F_A < \rho$ : Vật rắn chìm xuống khi lực đẩy Acsimet < trọng lượng

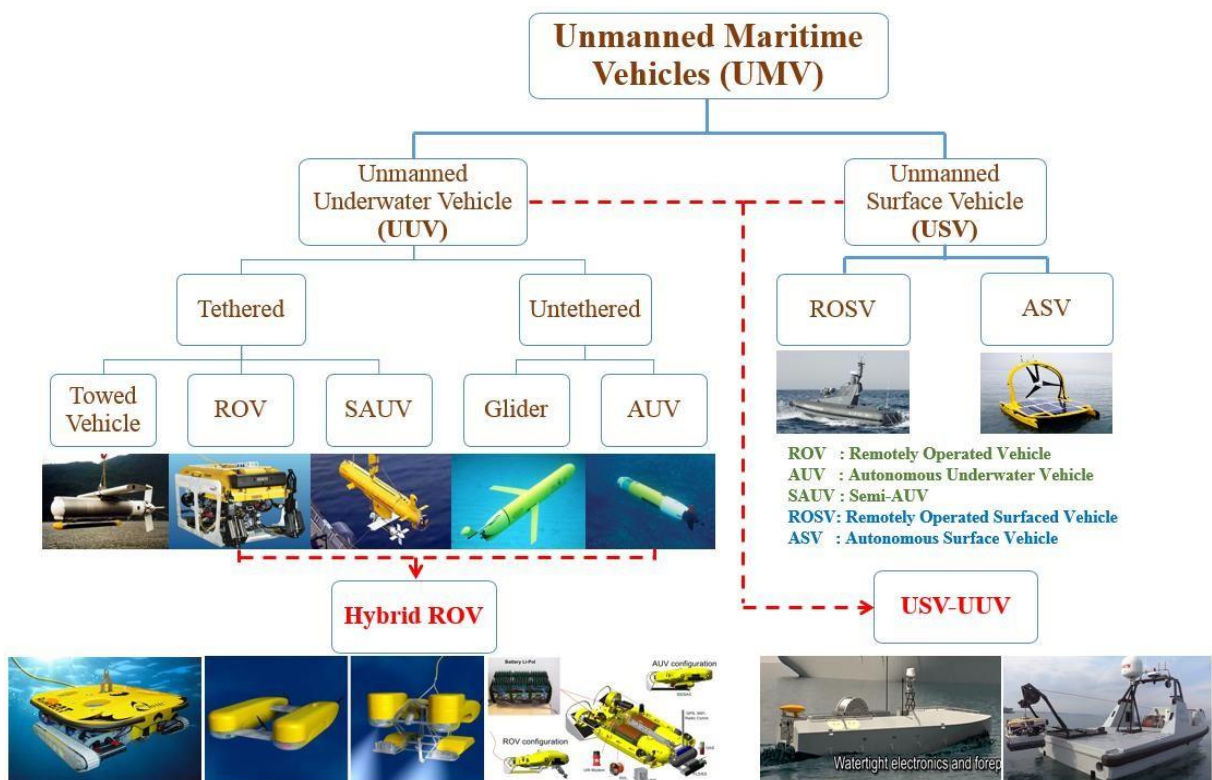
$F_A > \rho$ : Vật rắn sẽ nổi lên khi lực đẩy Acsimet > trọng lượng

$F_A = \rho$ : Vật rắn sẽ lơ lửng trong chất lỏng

Phương tiện chuyển động ngầm nói chung được nghiên cứu phát triển từ rất sớm, trong đó ứng dụng hai phương pháp lặn cơ bản như sau: Phương pháp lặn động lực (Dynamic diving) và phương pháp lặn tĩnh lực (Static diving). Phương pháp lặn động lực thường được sử dụng trong các mẫu phương tiện ngầm dân sự. Trong quân sự hiện đại phương tiện chuyển động ngầm khi lặn

thường sử dụng kết hợp cả hai phương pháp Dynamic diving và Static diving. Tàu chìm xuống nhờ sự bơm đầy các két dẫn chính. Sau đó, tính nổi được điều chỉnh thật chính xác bởi các két sắp xếp khoa học. Khi đã ở dưới nước, độ sâu của phương tiện chuyển động ngầm được điều khiển nhờ vào hệ thống cánh thủy lực (hydroplanes).

Hiện nay phương tiện chuyển động ngầm được chia thành nhiều loại khác nhau [1]. Căn cứ vào khả năng tham gia điều khiển của con người có thể phân thành hai loại chính: Phương tiện chuyển động ngầm có người lái và phương tiện chuyển động ngầm không người lái bên trong. Hình 1.1 là sơ đồ phân loại phương tiện chuyển động ngầm là phương tiện ngầm điều khiển từ xa (ROV), phương tiện ngầm có người lái và phương tiện chuyển động ngầm tự hành (AUV).



Hình 1.1. Phân loại phương tiện chuyển động ngầm [1]

Tàu ngầm là một trong những phương tiện chuyển động ngầm hiện đại với đội ngũ thủy thủ đoàn được tuyển chọn có thể điều khiển như phương tiện ngầm có người lái bên trong hoặc để chế độ tự động như một phương tiện ngầm tự hành (hình 1.2). Hiện nay trên thế giới các công trình nghiên cứu về động học, dẫn

đường, điều khiển cho phương tiện chuyển động ngầm rất đa dạng, nhưng những công bố có giá trị khoa học cao có thể ứng dụng vào thực tế chưa nhiều vì những lý do về bí mật an ninh quốc phòng nên không được công bố. Tuy nhiên từ những mối lo ngại về những rủi ro bất thường trong môi trường dưới nước hay an toàn tính mạng của con người nên phương tiện chuyển động ngầm có người lái thường được các tổ chức khoa học lớn mang tính chất quốc gia quan tâm nghiên cứu cho mục đích quân sự. Còn các cá nhân hay tổ chức nhỏ thường dành sự quan tâm lớn hơn cho phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV [12].

**- Phương tiện ngầm có người lái:**



*Hình 1.2. Phương tiện chuyển động ngầm có người lái*

**- Phương tiện ngầm điều khiển từ xa:**

Vào những năm 1980 Phương tiện chuyển động ngầm điều khiển từ xa không người lái điều khiển bằng dây ROV đã được nghiên cứu và bắt đầu thiết kế chế tạo. Cho đến nay, ROV đã khẳng định được vị trí của mình, là một trong những phương tiện chuyển động ngầm không người lái được sử dụng nhiều và có độ tin cậy cao trong số các thiết bị lặn dưới nước được chế tạo. Như ROV là thiết bị trong các công trình biển, công trình rải cáp quang hay phát hiện xác của tàu Titanic bị chìm dưới đáy biển. ROV sử dụng trong sự cố tràn dầu ở vịnh Mexico năm 2010. ROV được điều khiển bằng cáp nên có khả năng cơ động tốt được sử dụng cho các ứng dụng khác nhau [13].



*Hình 1.3. Phương tiện ngầm điều khiển từ xa*

ROV là thiết bị tự hành dưới nước có mức độ an toàn cao khi được điều khiển qua tàu mẹ nổi trên mặt nước có sử dụng cáp điều khiển, nó thường được gắn cảm biến, tay máy và camera ghi hình nên có thể làm việc ở độ sâu con người không thể lặn xuống hay trong các môi trường biển khắc nghiệt. Sự đa dạng của ROV chính là có thể làm việc trong khoảng thời gian dài dưới nước, cho các nhiệm vụ đa dạng cả trong quân sự và dân dụng. Tuy nhiên, nhược điểm của ROV là phạm vi hoạt động nhỏ phụ thuộc vào tàu mẹ và chiều dài dây cáp, với chi phí vận hành cao và nhiệm vụ phức tạp thì phụ thuộc nhiều vào trình độ và sức khỏe của người vận hành, ...[13].

**- Phương tiện ngầm tự hành:**

Phương tiện ngầm không có người lái bên trong điều khiển tự động ra đời nhằm khắc phục một số nhược điểm của ROV với nhiều hình dạng và đặc tính khác nhau cho những nhiệm vụ cụ thể. Các thiết bị này có khả năng hoạt động trong nhiều dạng môi trường khác nhau từ sông ngòi, vùng biển đến các vùng lạnh giá khắc nghiệt nhất. Ngày nay, cùng với việc phát triển của các dạng vật liệu mới, kỹ thuật máy tính, thiết bị cảm biến, cũng như sự tiến bộ về lý thuyết điều khiển robot, hàng loạt các dạng AUV nhỏ gọn, tiên tiến, thông minh và đáng tin cậy đã được chế tạo và đưa vào ứng dụng trong thực tế như quan trắc môi trường, khảo sát địa hình, ... [1]



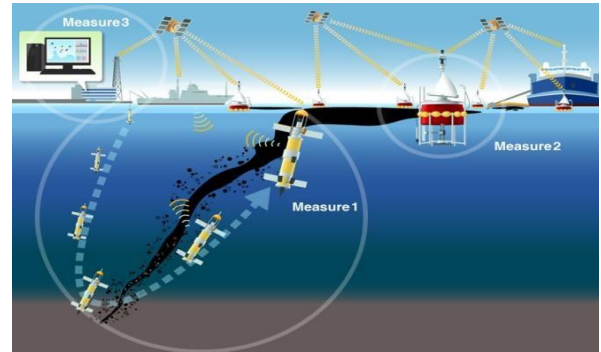
**Robot REMUS, Mỹ**



**Robot Autosub3, Anh**



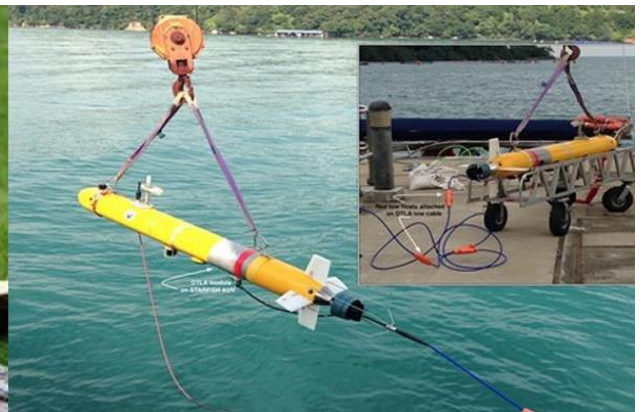
**Robot Aster XAUV, Pháp**



**Robot SOTAB-1, Nhật**



**Robot ISIMI, Hàn Quốc**



**Robot STAFISH, Singapore**

*Hình 1.4. Phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV*

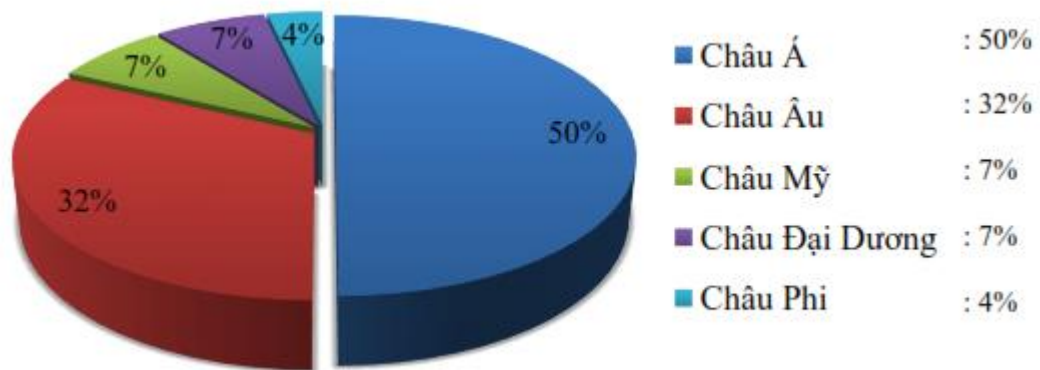
## **1.2. Một số ứng dụng tiêu biểu của AUV**

Trên thế giới, phương tiện tự hành dưới nước (AUV) đã có bước phát triển vượt bậc trong các thập niên qua. AUV có thể xem là bản cải tiến của ROV, là một phương tiện không người lái có khả năng tự hành cao cho các ứng dụng dưới nước. Chủ yếu có dạng ngư lôi với động cơ đẩy và cánh lái, có tính tự điều khiển. Có thể làm việc dưới nước trong thời gian dài, tùy thuộc vào nguồn năng lượng mang theo. AUV được trang bị các thiết bị cảm biến, phục vụ đa dạng tác vụ cho mục đích quân sự và dân dụng.

### Ứng dụng trong thực tế:

- Xây dựng bản đồ đáy biển
- Khảo sát, giám sát theo từng khu vực
- Thăm dò bề mặt địa chất, thu thập thông tin về các mỏ, khoáng sản
- Phát hiện, tiêu diệt các mục tiêu dưới nước, rà phá bom mìn
- Thu thập thông tin, theo dõi và trinh sát
- Tác chiến ngầm, khảo sát và nhận dạng
- Truyền nhận thông tin và định vị dưới nước
- Tác chiến đồ bộ
- Hỗ trợ phòng thủ và tấn công
- Nhiệm vụ đặc biệt (thủy lôi, đặt mìn ...)

Hiện nay các công bố khoa học về nghiên cứu AUV phục vụ quan trắc môi trường, khảo sát sông hồ và cứu hộ cứu nạn hay các mục đích quân sự được công bố tại rất nhiều quốc gia và 2 tổ chức WO, EP và được phân bổ tại 05 châu lục đã khẳng định tầm quan trọng của thiết bị này:



Hình 1.5. Tình hình công bố khoa học về AUV theo châu lục [1]

- Mỹ là quốc gia nghiên cứu sớm nhất nhưng từ những năm 1981 đến năm 2008 thì số lượng công bố khoa học về phương tiện ngầm tự hành mới bắt đầu tăng nhanh và trở thành 1 trong 2 quốc gia có số lượng sáng chế công bố nhiều nhất thế giới. Đứng thứ hai về công bố khoa học liên quan đến phương tiện chuyển động ngầm là Trung Quốc, trong giai đoạn từ những năm 2009 đến năm 2013 Trung Quốc liên tục là một trong năm quốc gia có số lượng công bố khoa học lớn. Thời gian gần đây Trung Quốc càng cho thấy tham vọng làm chủ công

nghe về phương tiện chuyển động ngầm khi liên tục là quốc gia nằm trong nhóm dẫn đầu. Hiện nay theo thống kê của tổ chức thế giới về AUV thì Trung Quốc đã vượt qua cả Mỹ và Nhật Bản để trở thành quốc gia số một thế giới về công trình khoa học trong lĩnh vực này. Nhật Bản là quốc gia Châu Á cùng với Úc thường xuyên nằm trong nhóm 5 quốc gia dẫn đầu về công bố quốc tế [1].

Bảng 1.1 minh họa sơ lược về quá trình phát triển sản phẩm AUV trên thế giới. Toàn bộ quá trình phát triển và đánh giá các loại sản phẩm về AUV thế giới có thể tham khảo trong [7] [14].

**Bảng 1.1: Hình ảnh về một số AUV gần đây nhất trên thế giới**

| Stt | Mô tả chính / hình ảnh                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | <p>AUV: Wukong được phát triển bởi trường Đại học Kỹ thuật Cáp Nhĩ Tân, năm 2019, Wukong dài 2 mét, rộng 1 mét và nặng 1,3 tấn. Trong hai lần thử nghiệm đầu tiên vào năm 2019, phương tiện chỉ đạt độ sâu 1.500m so với mực nước biển.</p> <p>- Chuyên thám hiểm thứ ba diễn ra từ ngày 24 tháng 2 đến ngày 1 tháng 4 tại Tây Thái Bình Dương. Con tàu đạt độ sâu tối đa 7.709 m và hoàn thành sứ mệnh lấy mẫu nước tại chỗ trước khi quay trở lại cảng Thanh Đảo ở tỉnh Sơn Đông TQ</p>  <p>- Đây là độ sâu lớn nhất mà một thiết bị lặn tự hành hoàn toàn (AUV) của Trung Quốc từng đạt được, phá vỡ kỷ lục trước đó là 5.213 m. Thành công này sẽ đặt nền móng cho các thử nghiệm lặn sâu 11.000 m trong tương lai, với mục tiêu chinh phục rãnh Mariana.</p> |
| 2   | <p>AUV: Vityaz-D Do Nga sản xuất Theo hãng thông tấn TASS, được giới thiệu tại diễn đàn công nghệ và quân sự quốc tế Army-2020. Vityaz là tàu</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

lặn tự hành hoàn toàn đầu tiên trên thế giới chạm tới đáy vực Mariana. Vực Mariana là khu vực sâu nhất của đáy biển thế giới, có vị trí gần quần đảo Mariana ở Thái Bình Dương.



Con tàu lặn đến độ sâu 10.028m này hứa hẹn sẽ giúp ngành công nghiệp quốc phòng Nga đạt đến một tầm cao mới trong tương lai.

Vityaz-D là thiết bị đầu tiên không chỉ ở Nga mà còn trên toàn thế giới đã thực hiện một cách tự động chuyến thám hiểm xuống nơi sâu nhất của Đại dương. Vityaz-D đã hoàn thành nhiệm vụ xuất sắc và có thể tự động nổi lên mặt nước.

- 3 AUV: Dolphin là sản phẩm nghiên cứu của Đại học Bách khoa Hà Nội đứng đầu nhóm nghiên cứu là PGS.TS Trương Việt Anh NCS tại trường ĐH Tohoku, Nhật Bản,  
Công bố tại triển lãm "Ứng dụng khoa học, công nghệ trong doanh nghiệp" tại Trung tâm Hội nghị Quốc gia 12/2019



Dolphin có khả năng điều khiển hành trình theo phương thức tự hành hoặc theo chương trình, đồng thời tích hợp điều khiển thủy âm hoặc giọng nói. Dolphin có đường kính thân chính 250mm, chiều dài 2100mm, khối lượng 80kg, độ sâu lặn thiết kế tối đa 50m, thời gian hoạt động dưới nước liên tục từ 6-8 giờ.

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | <p>AUV Bluefin 9 được phát triển bởi tập đoàn của Mỹ từ năm 2010. Thông số kỹ thuật của AUV như sau: Nặng 60,5kg, Dài 1,65 m, rộng 0,24 m, có thể lặn sâu nhất 200, vận tốc di chuyển tối đa là 2 m/s, có khả năng hoạt động 12 giờ liên tục trên biển.</p> <p>- Nhiệm vụ: Bảo vệ hải cảng, giàn khoan, thăm dò khai thác tài nguyên biển, bảo vệ môi trường.</p> |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



Bảng 1.2 Hãng Douglas – Westwood [15] nghiên cứu chiến lược về dữ liệu và thống kê AUV từ năm 2009 và đến năm 2019 và dự báo về tình hình phát triển AUV trong giai đoạn hiện nay.

**Bảng 1.2: Dữ liệu thống kê và dự báo về phát triển AUV trên thế giới**

| Giai đoạn    | Số lượng AUV | Lĩnh vực sử dụng                                                                                                                                                      | Căn cứ                                                                                                                                                                                                           |
|--------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Trước - 2009 | 629          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quân sự: 23%,</li> <li>- Thăm dò: 41%,</li> <li>- Nghiên cứu: 35%,</li> <li>- Khác: 11%.</li> </ul>                          | - Thực tế AUV đã phát triển.                                                                                                                                                                                     |
| 2019         | 1144         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quân sự: 49%,</li> <li>- Nghiên cứu: 31%,</li> <li>- Dầu khí: 8%,</li> <li>- Thủy văn: 7%,</li> <li>- Cá ngừ: 5%.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nhu cầu năng lượng và khai thác dầu khí trữ lượng dưới lòng đại dương.</li> <li>- Yêu cầu an ninh quốc phòng.</li> <li>- Tiềm năng tài nguyên sinh vật biển.</li> </ul> |

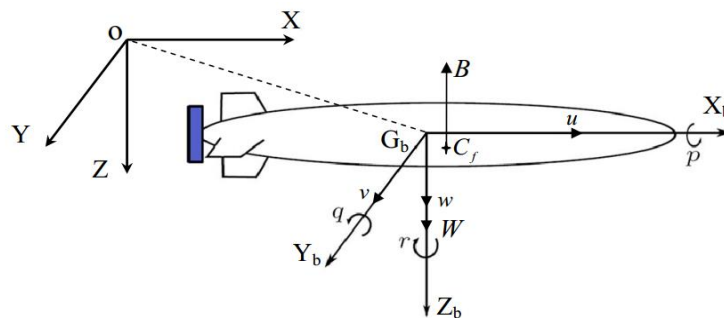
### 1.3. Hệ tọa độ của thiết bị lặn tự hành AUV

Mô hình động học của thiết bị lặn tự hành AUV được xây dựng dựa trên lý thuyết cơ học, những nguyên lý của động học và tĩnh học. Mô hình động học của AUV được sử dụng để thiết kế các hệ thống điều khiển cho phương tiện này đáp ứng các mục tiêu cụ thể. Nói chung, chuyển động của AUV có thể được biểu diễn bằng phương trình chuyển động với sáu bậc tự do (6-DOF) [7], [8]. Các thành phần như chiều chuyển động, lực và mô men tác động, tốc độ và vị trí cho AUV được biểu diễn trong bảng 1.3

**Bảng 1.3: Các ký hiệu của SNAME**

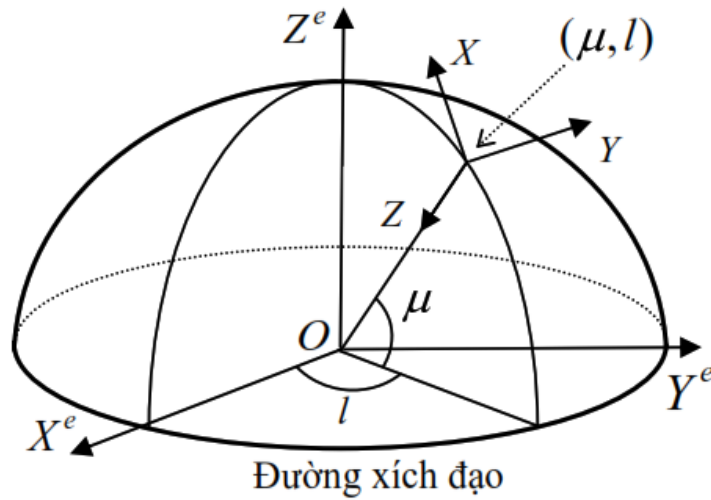
| Bậc tự do | Chuyển động                         | Lực và mô-men | Tốc độ dài và tốc độ góc | Vị trí và góc Euler |
|-----------|-------------------------------------|---------------|--------------------------|---------------------|
| 1         | Trượt dọc theo trục x (Surge)       | X             | u                        | x                   |
| 2         | Trượt ngang theo trục y (Sway)      | Y             | v                        | y                   |
| 3         | Trượt đứng theo trục z (Heave)      | Z             | w                        | z                   |
| 4         | Lắc ngang quanh trục x (Roll, heel) | K             | p                        | $\phi$              |
| 5         | Lắc dọc quanh trục y (pitch, trim)  | M             | q                        | $\theta$            |
| 6         | Quay trở quanh trục z (Yaw)         | N             | r                        | $\psi$              |

Hệ tọa độ  $(x, y, z)$  là vị trí của phương tiện chuyển động ngầm theo chuyển động tịnh tiến dọc các trục  $0x$ ,  $0y$  và  $0z$ , và đạo hàm  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  theo thời gian chính là vận tốc của các chuyển động tịnh tiến đó  $(u, v, w)$ . Các tọa độ  $(\phi, \theta, \psi)$  là các góc miêu tả hướng chuyển động của phương tiện ngầm AUV quanh các trục  $x, y, z$  và tốc độ quay quanh  $(p, q, r)$  chính là đạo hàm theo thời gian theo các tọa độ tương ứng  $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$  với hệ quy chiếu tính từ hệ tọa độ địa lý OXYZ đến hệ quy chiếu của hệ tọa độ gắn thân  $G_b X_b Y_b Z_b$  như hình 1.6.



**Hình 1.6. Biểu diễn hệ tọa độ của AUV [9]**

Để phân tích chuyển động của phương tiện chuyển động ngầm thường quan tâm đến hệ tọa độ địa lý OXYZ và hệ tọa độ cố định tâm trái đất  $OX^eY^eZ^e$ . Mỗi quan hệ giữa hai hệ tọa độ này được thể hiện trên hình 1.7.



Hình 1.7. Quan hệ của hệ tọa độ địa lý và hệ tọa độ cố định tâm trái đất [9]

Hệ tọa độ  $OX^eY^eZ^e$  (Earth-Centered Reference Frames) gồm:

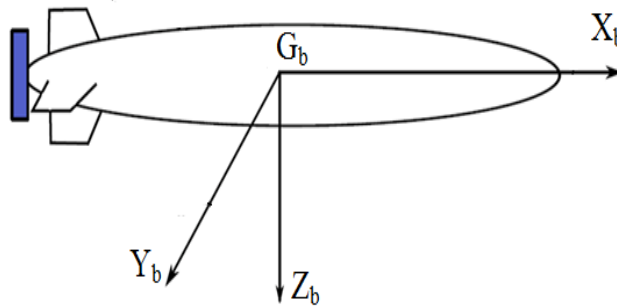
Khung tọa độ ECI (i-frame) là khung quán tính để định vị trái đất (thỏa mãn định luật II Newton khi xét đến các chuyển động có khung quy chiếu của hệ tọa độ không có gia tốc). ECEF (e-frame)  $OX^eY^eZ^e$  có gốc gắn với tâm trái đất nhưng trục quay góc  $\omega_e = 7.2921 \cdot 10^{-5}$  rad/s so với khung quán tính ECI. Chuyển động quay của trái đất có thể bỏ qua đối với phương tiện hàng hải, do đó có thể coi khung e-frame là khung quán tính. Trong thực tế khung tọa độ e-frame được sử dụng cho điều khiển, định vị và dẫn đường nói chung khi miêu tả chuyển động của phương tiện chuyển động ngầm và vị trí trên đại dương [11].

Khung tọa độ OXYZ (Geographic Reference Frames) gồm:

Hệ tọa độ NED (*n-frame*) là hệ tọa độ *North-East-Down* OX Y Z trong nghiên cứu về phương tiện chuyển động ngầm và được định nghĩa là chuyển động tiếp tuyến với bề mặt của trái đất, xác định hướng bắc (N) theo trục x, xác định hướng đông (E) theo trục y và hướng tới bề mặt trái đất (D) theo trục z để tạo thành một tam diện thuận. Với hai góc là  $l$  (kinh độ) và  $\mu$  (vĩ độ) để xác định vị trí của AUV theo hệ tọa độ *n-frame* so với *e-frame* [8].

Kinh độ và vĩ độ gần như không đổi khi phương tiện hàng hải hoạt động trong vùng biển cố định nên có thể định vị phương tiện chuyển động ngầm bằng cách sử dụng mặt phẳng tiếp tuyến trên bề mặt trái đất. Như vậy khi coi trái đất như một mặt phẳng thì AUV có thể định vị trên hệ tọa độ n – frame là khung tọa độ quán tính nên định luật II Newton vẫn được áp dụng trong trường hợp này.

Hệ tọa độ BODY (*b-frame*) là hệ tọa độ gắn liền với phương tiện, di chuyển cùng phương tiện trong khung quy chiếu gắn thân  $G_b X_b Y_b Z_b$  (hình 1.8).



Hình 1.8. Hệ tọa độ gắn thân [9]

Vận tốc góc và vận tốc dài của phương tiện hàng hải thường được biểu diễn trong khung tọa độ gắn thân b – frame còn vị trí và hướng của phương tiện hàng hải lại được biểu diễn trên hệ tọa độ n – frame (vì hệ tọa độ n – frame và hệ tọa độ e – frame là xấp xỉ bằng nhau). Những nghiên cứu về phương tiện hàng hải thường được chia thành hai thành phần như sau [8]:

- Nghiên cứu về chuyển động (Kinematic) phân tích về vị trí và hướng đi
- Nghiên cứu về những lực gây ra chuyển động (Dynamic).

Với nhiều phương tiện ngầm, Fossen [16] đưa ra mô hình longitudinal model (chiều dọc) và mô hình lateral model (chiều ngang) bằng cách phân chia 6 phương trình chuyển động thành các hệ thống con không tương tác với nhau (hoặc ít tương tác với nhau):

- Mô hình chuyển động dọc: Là các trạng thái  $(u, w, q)$  và  $(N, D, \theta)$ ;
- Mô hình chuyển động ngang: Là các trạng thái  $(v, p, r)$  và  $(E, \phi, \varphi)$ .

#### 1.4. Mô tả động học phương tiện chuyển động ngầm

Đối với AUV thường chuyển động trong khoảng cách ngắn có thể xem bề mặt đất là phẳng, khi đó hệ tọa độ địa lý được xem như là hệ tọa độ dẫn đường. Lực, mô men, vận tốc đối với hệ tọa độ gắn liền được ký hiệu bởi các véc tơ sau:

$\underline{\tau}_1 = (X, Y, Z)^T$  véc tơ ngoại lực tác dụng lên AUV;

$\underline{\tau}_2 = (K, M, N)^T$  véc tơ mô men ngoại lực tác dụng lên AUV;

$\underline{V} = (u, v, w)^T$  véc tơ vận tốc dài chiếu lên các trục hệ tọa độ gắn liền  $X_b, Y_b, Z_b$ ;

$\underline{\omega} = (p, q, r)^T$  véc tơ vận tốc góc tuyệt đối của hệ tọa độ gắn liền;

Vị trí và góc định hướng của AUV đối với hệ tọa độ địa lý:

$\underline{\eta}_1 = (x, y, z)^T$  vị trí tâm khối của phương tiện ngầm trong hệ tọa độ địa lý;

$\underline{\eta}_2 = (\gamma, \partial, \psi)^T$  góc định hướng giữa hệ tọa độ gắn liền của phương tiện ngầm với hệ tọa độ địa lý;

Ký hiệu:  $\underline{v} = (\underline{V}^T, \underline{\omega}^T)^T = (u, v, w, p, q, r)^T$ ;  $\underline{\eta} = (\underline{\eta}_1^T, \underline{\eta}_2^T)^T = (x, y, z, \gamma, \partial, \psi)^T$

Mối quan hệ giữa các thành phần véc tơ trong hệ tọa độ gắn liền với hệ tọa độ địa lý [16]:

$$\dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \quad (1.2)$$

Trong đó,

$$J(\underline{\eta}) = \begin{bmatrix} C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J(\underline{\eta}_2) \end{bmatrix} \text{ với } J(\underline{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & \tan \partial \sin \gamma & \tan \partial \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma / \cos \partial & \cos \gamma / \cos \partial \end{bmatrix}$$

Phương trình chuyển động của AUV dưới dạng tổng quát trong hệ tọa độ gắn liền [12], [16]:

$$M_{RB} \dot{\underline{v}} + C_{RB}(\underline{v})\underline{v} = \underline{\tau}_{RB} \quad (1.3)$$

Trong đó,  $M_{RB}$  là ma trận quán tính;  $C_{RB}$  là ma trận hướng tâm Coriolis;  $\underline{\tau}_{RB}$  là véc tơ ngoại lực và mô men ngoại lực tác động lên thân AUV.

Véc tơ vận tốc  $\underline{v}$  và vị trí, véc tơ tham chiếu  $\underline{\eta}$  có thể được biểu diễn như sau:

Với

$$\begin{cases} \eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \in R^6 \\ v = [v_1^T, v_2^T]^T \in R^6 \end{cases} \quad (1.4)$$

Với:

$$\begin{cases} \eta_1 = [x, y, z]^T \in R^3 \\ \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \in R^3 \end{cases} \quad \text{và} \quad \begin{cases} v_1 = [u, v, w]^T \in R^3 \\ v_2 = [p, q, r]^T \in R^3 \end{cases}$$

Đạo hàm bậc nhất theo thời gian véc-tơ vị trí suy ra mối liên hệ với véc-tơ vận tốc như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \\ \dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \end{cases} \quad (1.5)$$

Như vậy phương trình mô tả vị trí và hướng của thiết bị lặn tự hành AUV:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1.6)$$

Với:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta).\cos(\psi) & \sin(\phi).\sin(\theta).\cos(\psi) - \cos(\phi).\sin(\psi) & \cos(\phi).\sin(\theta).\cos(\psi) + \sin(\phi).\sin(\psi) \\ \cos(\theta).\sin(\psi) & \sin(\phi).\sin(\theta).\sin(\psi) + \cos(\phi).\cos(\psi) & \cos(\phi).\sin(\theta).\sin(\psi) - \sin(\phi).\cos(\psi) \\ -\sin(\theta) & \sin(\phi).\cos(\theta) & \cos(\phi).\cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)\sec(\theta) & \cos(\phi)\sec(\theta) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Ma trận chuyển đổi  $J_2(\eta_2)$  không thỏa mãn những tính chất của ma trận trực giao và không cho phép xác định đối với góc quay lật  $\theta = \pm 90^\circ$ . Tàu nổi trên mặt biển không được phép hoạt động ở góc quay lật  $\theta = \pm 90^\circ$ , tuy nhiên phương tiện ngầm và máy bay thì có thể hoạt động tại điểm đặc biệt này, chi tiết được trình bày trong luận án tiến sĩ của tác giả Trương Duy Trung Viện khoa học kỹ thuật quân sự năm 2014 [9].

Vì thế, ngoài việc lập kế hoạch hoạt động, xác định chính xác vị trí phương tiện chuyển động ngầm liên tục tại mọi thời điểm là một phần không thể thiếu trong dẫn đường điều khiển. Do đó dẫn đường cho AUV khác với dẫn đường cho tàu nổi trên mặt nước ở hai điểm cơ bản sau:

- Một là, tàu nổi trên mặt nước chỉ cần xác định vị trí trong không gian 2 chiều, nghĩa là chỉ cần quan tâm đến tọa độ theo kinh độ và tọa độ theo vĩ độ (hệ tọa độ XY), còn AUV cần xác định vị trí tàu theo không gian 3 chiều, ngoài tọa độ theo kinh, vĩ độ còn quan tâm đến tọa độ sâu theo độ sâu trục Z hướng xuống dưới (hệ tọa độ XYZ).

- Hai là, các tàu nổi trên mặt nước và cả phương tiện chuyển động ngầm, có được trang bị hệ thống dẫn đường quán tính hay không, thì khi hành trình nổi luôn luôn có điều kiện quan sát được các vệ tinh của hệ thống GNSS, còn đối với phương tiện chuyển động ngầm là phương án kết hợp GNSS/INS. Khi hành trình ngầm, Phương tiện chuyển động ngầm hoàn toàn sử dụng hệ thống dẫn đường quán tính và một số phương án kỹ thuật kết hợp khác để dẫn đường mà mất hẳn tín hiệu từ hệ thống vệ tinh dẫn đường [10].

Khi AUV hoạt động gần bề mặt, có nhiều yếu tố có thể ảnh hưởng đến động học của AUV nhưng có 3 lực chính tác động vào AUV được tổng hợp lại như sau, thứ nhất là sóng cấp 1 và sóng cấp 2; thứ 2 là lực thủy động tác dụng lên bánh lái và thứ 3 là lực ảnh hưởng theo hiệu ứng Venturi. Như vậy khi xét gốc tọa độ của phương tiện chuyển động ngầm trùng với trọng tâm AUV, suy ra:

+ Phương trình chuyển động theo phương thẳng đứng:

$$\begin{aligned} m(w - uq + vp) = & \frac{\rho}{2} L^4 \left[ Z'_q \dot{q} \right] + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ Z'_w \dot{w} + Z'_{vp} vp + Z'_q uq \right] \\ & + \frac{\rho}{2} L^2 \left[ Z'_0 u^2 + Z'_w uw + Z'_{w|w} w \left| \sqrt{(v^2 + w^2)} \right| + Z'_w v^2 + (Z'_{\delta_s} \delta_s + Z'_{\delta_b} \delta_b) u^2 \right] + Z_{wave} \\ I_y \dot{q} (I_x - I_z) rp = & \frac{\rho}{2} L^5 \left[ M'_q \dot{q} + M'_{rp} rp \right] + \frac{\rho}{2} L^4 \left[ M'_w \dot{w} + M'_q uq + M'_{|w|q} \left| \sqrt{(v^2 + w^2)} \right| a \right] \\ & + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ M'_0 u^2 + M'_w v^2 + M'_w uw + (M'_{\delta_s} \delta_s + M'_{\delta_b} \delta_b) u^2 \right] - mgh \sin \theta + M_{wave} \quad (1.8) \end{aligned}$$

+ Phương trình chuyển động theo phương ngang:

$$I_z \dot{r} = \frac{\rho}{2} L^5 \left[ N'_r \dot{r} \right] + \frac{\rho}{2} L^4 \left[ N'_v \dot{v} + N'_r ur + N'_{|v|r} \left| \sqrt{(v^2 + w^2)} \right| r \right] + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ N'_v uv + N'_{\delta_r} u^2 \delta_r \right] + M_{wave} \quad (1.9)$$

$$I_x \dot{p} = \frac{\rho}{2} L^4 \left[ K'_v \dot{v} + K'_r ur \right] + \frac{\rho}{2} L^3 \left[ K'_v uv \right] - mgh \cos \theta \sin \phi + M_{wave} \quad (1.10)$$

Với  $Z_{wave}$  và  $M_{wave}$  lần lượt là lực và mô men của sóng tác động vào phương tiện chuyển động ngầm.

Trường hợp AUV lặn xuống, AUV chịu sự tác động của dòng chảy, áp lực nước và mô men thủy tĩnh.

Lực thủy động ảnh hưởng trực tiếp đến chuyển động lặn xuống của phương tiện ngầm (chuyển động thẳng đứng) là hợp lực của những lực sau: Dòng chảy, trọng lực, áp lực nước, lực nổi trọng lực và mô men.

Trọng lực của phương tiện ngầm  $W = m.g$ ; với  $m$  là khối lượng phương tiện ngầm,  $g$  là gia tốc trọng trường.

Lực nổi phương tiện ngầm được tính theo công thức  $B = \rho g \nabla$ , trong đó  $\nabla$  là lượng giãn nước của phương tiện chuyển động ngầm.

Lực nổi dư được tính theo công thức:  $\Delta = W - B$ , chính là nguyên nhân làm sai lệch lực lặn nổi trong tính toán của các bộ điều khiển trong phương tiện ngầm như: Ngư lôi, đạn được.

Khi  $\Delta > 0$ , tức là AUV đủ trọng lượng nặng sẽ lặn xuống;

Khi  $\Delta < 0$ , AUV không đủ trọng lượng sẽ nổi lên;

Khi  $\Delta = 0$ , AUV ở chế độ cân bằng, trạng thái nằm lơ lửng trong mặt nước.

Lực nổi dư không những phụ thuộc vào trọng tâm AUV, mà đôi khi còn phụ thuộc vào lực nổi dư của mô men khi vị trí xác định cách trọng tâm một khoảng  $x_p$ .

$$\Delta M_p = -\Delta P . x_p \quad (1.11)$$

Ngoài ra, theo lý thuyết lực thủy tĩnh, trọng lực của AUV và lực nổi không tác dụng cùng lúc theo một mặt phẳng thẳng đứng để tạo nên lực thủy tĩnh, mà còn chịu ảnh hưởng của tác dụng ngang và tác dụng thẳng đứng của khối lượng nước dưới thân AUV tạo nên.

$$M_H(\theta) = -mgh \sin \theta \quad (1.12)$$

Công thức (1.16) có  $h$  là chiều cao tâm nghiêng của khối lượng nước được bơm ra,  $m$  là khối lượng của AUV,  $\theta$  là góc nghiêng dọc, dấu "-" là do chuyển động ngược hướng với chiều quay quy định [10].

Theo chiều dọc phương trình chuyển động các lực thủy tĩnh được xác định theo ma trận sau:

$$\begin{cases} m\left(\dot{u} + wq\right) = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uu}u^2 + X_{ww}w^2 + X_{qq}q^2 + X_{\delta_s\delta_s}\delta_s^2 + X_{\delta_b\delta_b}\delta_b^2 + X_T + W\theta \\ m\left(\dot{w} + uq\right) = Z_0 + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_w w + Z_{|w|}|w| + Z_q q + Z_{w|w|}w|w| + Z_{ww}w^2 + Z_{w|q|}w|q| + Z_{q|q|}q|q| + \\ Z_{\delta_s}\delta_s + Z_{\delta_b}\delta_b + Z_{q|\delta_s|}|q|\delta_s + W \\ I_y\dot{q} = M_0 + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_w w + M_{|w|}|w| + M_q q + M_{w|w|}w|w| + M_{ww}w^2 + M_{w|q|}w|q| + M_{q|q|}q|q| + \\ M_{\delta_s}\delta_s + M_{\delta_b}\delta_b + M_{q|\delta_s|}|q|\delta_s + X_T Z_T + M_p + M_0\theta \\ q = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \end{cases} \quad (1.13)$$

Phương trình chuyển động trên đây bao gồm  $u(t), w(t), q(t)$  và  $\theta(t)$  là bốn thông số chuyển động ẩn, thường xuyên được xác định bằng phương trình lực dọc trục (phương trình X), phương trình lực thẳng đứng (phương trình Z), phương trình mô men dọc (phương trình M), và phương trình bỏ trợ  $q = \dot{\theta}$ . Khi điều khiển bánh lái, theo quy tắc  $\delta_s(t), \delta_b(t)$  và điều kiện lực thủy tĩnh  $P(t), Mp(t)$ , các thông số chuyển động của phương tiện ngầm ẩn như  $u(t), w(t), q(t), \theta(t)$  được giải quyết.

Một trong những chuyển động cần nghiên cứu là chuyển động của phương tiện chuyển động ngầm ở trạng thái thả trôi (ngầm). Phương tiện ngầm được gọi là thả trôi ở tư thế cân bằng tĩnh khi có các đặc điểm sau đây:

- + Phương tiện ngầm chìm hoàn toàn trong nước, không sử dụng bánh lái hay chân vịt;
- + Phương tiện chuyển động ngầm chìm hay nổi của là chuyển động thẳng có hướng;
- + Phương tiện ngầm thả trôi chỉ cần các tham số dưới đây, những tham số của chuyển động có thể lấy giá trị bằng 0.

$$w \neq 0, \dot{w} \neq 0, q \neq 0, \dot{q} \neq 0 \quad (1.14)$$

$$V_{Z_0} = \dot{z}_0 = \dot{H} = w \quad (1.15)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (1.16)$$

Trong đó,  $w$  là tốc độ lặn hoặc nổi của AUV theo phương thẳng đứng,  $H$  là độ sâu,  $\dot{H}$  là tốc độ thay đổi độ sâu lặn,  $\dot{\theta}$  là tốc độ thay đổi của góc lắc dọc  $q$ .

Trong thời gian thả trôi ở trạng thái cân bằng tĩnh, AUV chịu lực mất cân bằng tác dụng từ bên ngoài  $Z_0(t)$ , lực nén theo chiều thẳng đứng  $Z_1(t)$ , mật độ nước biển theo độ sâu  $Z_2(t)$ , lực phát sinh trong khi không chế các khoang chứa nước  $Z_3(t)$ , các mô men ban đầu  $M_0(T.m)$ , mô men không chế khoang chứa nước phát sinh cân bằng tàu  $M_3(T.m)$ .

Trong khi thả trôi tàu ngầm ở trạng thái cân bằng tĩnh, hướng di chuyển của nó không dễ bị không chế, dẫn đến phương tiện chuyển động ngầm sẽ trôi theo chiều dòng chảy, có thể chỉ không chế được độ sâu hoạt động của phương tiện chuyển động ngầm.

Giả thiết rằng, trong phương trình chuyển động thẳng, do  $Z'_q, Z'_w, Z'_{ww}$  quá nhỏ, có thể bỏ qua các lực này, đồng thời cũng có thể bỏ qua các lực  $M'_q, M'_w, M'_{ww}$ , ta có phương trình rút gọn khi AUV hoạt động ở trạng thái thả trôi như sau:

$$\begin{cases} \dot{w} = \frac{1}{2m} \rho L^4 Z'_{q|q} q|q| + \frac{1}{2m} \rho L^3 Z'_{w|w} w|w| + \frac{1}{m} (Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3) \\ \dot{q} = \frac{1}{2I_y} \rho L^5 M'_{q|q} q|q| + \frac{1}{2I_y} \rho L^4 M'_{w|q} w|q| + \frac{1}{2I_y} \rho L^3 M'_{w|w} w|w| - \frac{mgh\theta}{I_y} + \frac{M_0 + M_3}{I_y} \\ \dot{H} = w \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (1.17)$$

Trong hệ phương trình (1.17), các yếu tố hệ số thành phần được xác định như sau:

$$Z'_{q|q} = \frac{Z_{q|q}}{0.5\rho L^4}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } Z \text{ như là hàm của } q|q|;$$

$$Z'_{w|q} = \frac{Z_{w|q}}{0.5\rho L^3}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } Z \text{ như là hàm của } w|q|;$$

$$Z'_{w|w} = \frac{Z_{w|w}}{0.5\rho L^2}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } Z \text{ như là hàm của } w|w;$$

$$M'_{q|q} = \frac{M_{q|q}}{0.5\rho L^4}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } M \text{ như là hàm của } q|q;$$

$$M'_{w|q} = \frac{M_{w|q}}{0.5\rho L^4}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } M \text{ như là hàm của } w|q;$$

$$M'_{w|w} = \frac{M_{w|w}}{0.5\rho L^3}, \text{ Là hệ số đại diện cho biến } M \text{ như là hàm của } w|w;$$

$$\text{Nếu đặt } Z_m = \frac{1}{m}, M_\theta = -\frac{mgh}{I_y}; M_1 = \frac{1}{I_y}, \text{ công thức (1.17) trở thành (1.18).}$$

$$\begin{cases} \dot{w} = Z_m \left( Z'_{q|q} q|q + Z'_{w|q} w|q + Z'_{w|w} w|w + Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 \right) \\ \dot{q} = M_1 \left( M'_{q|q} q|q + M'_{w|q} w|q + M'_{w|w} w|w + M_0 + M_3 \right) + M_\theta \theta \\ \dot{H} = w \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (1.18)$$

Những công thức từ 1.8, 1.13, .... 1.18 mô tả những thông số cơ bản chuyển động của phương tiện chuyển động ngầm từ tốc độ lặn, nổi của AUV ( $w$ ), độ lặn sâu của AUV ( $H$ ), tốc độ thay đổi độ sâu lặn ( $\dot{H}$ ), góc lắc dọc ( $\theta$ ), tốc độ thay đổi của góc lắc dọc ( $\dot{\theta}$ ) đến các thông số chuyển động ẩn như  $u(t), w(t), q(t), \theta(t)$  của AUV [10]. Là cơ sở để xây dựng phương trình chuyển động, các lực và mô men của phương tiện ngầm trong phần xây dựng mô hình toán ở phần tiếp theo.

### 1.5. Các lực và mô men ngoại lực tác động lên AUV

Xét loại AUV được điều khiển bởi chân vịt là động cơ đẩy, bánh lái hướng làm nhiệm vụ điều khiển theo hướng, vừa điều khiển giảm lắc và một hệ thống bơm điều khiển AUV theo độ sâu hay góc chúc ngóc, truyền động quay các bánh lái này là các máy lái điện. Ngoại lực và mô men ngoại lực tác động lên AUV được biểu diễn:

$$\underline{\tau}_{RB} = M_A \dot{\underline{v}} + C_A(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + L(\underline{v})\underline{v} + \underline{g}(\underline{\eta}) + \underline{\tau} \quad (1.19)$$

Với  $M_A, C_A(\underline{v})$  là ma trận quán tính và ma trận hướng tâm Coriolis khối nước kèm;  $D(\underline{v})$  là ma trận và mô men thủy động;  $\underline{g}(\underline{\eta})$  là véc tơ lực và mô men gây ra bởi trọng lực và lực nổi;  $L(\underline{v})$  là ma trận thông số lực và mô men của bánh lái;  $\underline{\tau} = \underline{\tau}_{bl} + \underline{\tau}_{pl}$  là lực và mô men của bánh lái và động cơ đẩy [9].

### 1.5.1. Các lực và mô men gây ra bởi trọng lực và lực nổi

Lực nổi (lực Acsimet)  $B$  tác động tại tâm nổi có tọa độ  $\underline{C}_f = (x_f, y_f, z_f)^T$  đối với hệ tọa độ gắn liền và trọng lực  $W$  tác động tại tâm khối  $G_b$  (hình 1.9).

Xét hệ tọa độ gắn liền với gốc tọa độ tại tâm khối  $G_b$  khi này tọa độ của tâm khối trong hệ tọa độ gắn liền là  $\underline{G}_b = (x_b, y_b, z_b)^T = (0, 0, 0)^T$ . Đối với AUV thì  $W = B$ , đồng thời tâm khối và tâm nổi được thiết kế nằm trong cùng mặt phẳng đối xứng tức là  $y_f = 0$ . Lực và mô men gây ra bởi trọng lực và lực nổi được biểu diễn trong hệ tọa độ gắn liền [12]:

$$\underline{g}(\underline{\eta}) = \begin{bmatrix} X_{HS} \\ Y_{HS} \\ Z_{HS} \\ K_{HS} \\ M_{HS} \\ N_{HS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ z_f B \cos \partial \sin \gamma \\ z_f B \sin \partial + x_f B \cos \partial \cos \gamma \\ -x_f B \cos \partial \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

Với  $X_{HS}, Y_{HS}, Z_{HS}, K_{HS}, M_{HS}, N_{HS}$  là các lực và mô men trong hệ tọa độ gắn liền,  $B$  là lực nổi (lực Acsimet)

### 1.5.2. Các lực và khối nước kèm

Nhìn chung các đối tượng chuyển động dưới nước có tốc độ thấp, khi đó lực và mô men tạo ra bởi khối nước kèm được mô tả [16]:

$$\begin{cases} X_A = X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{wq} wq + X_{qq} qq + X_{vr} vr + X_{rr} rr \\ Y_A = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{ur_a} ur + Y_{wp} wp + Y_{pq} pq \\ Z_A = Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{uq_a} uq + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp \\ K_A = K_{\dot{p}} \dot{p} \\ M_A = M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{uw_a} uw + M_{vp} vp + M_{rp} rp + M_{uq_a} uq \\ N_A = N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{uv_a} uv + N_{wp} wp + N_{pq} pq + N_{ur_a} ur \end{cases} \quad (1.21)$$

Khi phương tiện chuyển động sẽ ép chất lỏng bao quanh tàu dao động với các biên độ lớp bao chất lỏng khác nhau, đồng bộ với chuyển động điều hòa cưỡng bức của phương tiện. Khối lượng nước kèm được hiểu như lực và mô men cảm ứng áp suất sinh ra từ chuyển động điều hòa cưỡng bức của vật rắn và tỉ lệ với gia tốc của vật rắn. Trong đó  $M_A$  là ma trận quán tính hệ thống của khối lượng nước kèm,  $C_A(v)$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm thủy động lực học. Ma trận  $M_A$  là ma trận vuông 6x6 được định nghĩa như sau:

$$M_A = - \begin{bmatrix} \ddot{X}_u & \ddot{X}_v & \ddot{X}_\omega & \ddot{X}_p & \ddot{X}_q & \ddot{X}_r \\ \ddot{Y}_u & \ddot{Y}_v & \ddot{Y}_\omega & \ddot{Y}_p & \ddot{Y}_q & \ddot{Y}_r \\ \ddot{Z}_u & \ddot{Z}_v & \ddot{Z}_\omega & \ddot{Z}_p & \ddot{Z}_q & \ddot{Z}_r \\ \ddot{K}_u & \ddot{K}_v & \ddot{K}_\omega & \ddot{K}_p & \ddot{K}_q & \ddot{K}_r \\ \ddot{M}_u & \ddot{M}_v & \ddot{M}_\omega & \ddot{M}_p & \ddot{M}_q & \ddot{M}_r \\ \ddot{N}_u & \ddot{N}_v & \ddot{N}_\omega & \ddot{N}_p & \ddot{N}_q & \ddot{N}_r \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Ký hiệu của SNAME (1950) được sử dụng trong biểu thức này như sau, ví dụ lực khối lượng nước kèm thủy động lực học  $Y$  dọc theo trục  $y$  do gia tốc  $\ddot{u}$  (hướng  $x$ ) tạo ra được viết như sau [9], [10]:

$$Y = -Y_{\ddot{u}} \ddot{u} \quad \text{trong đó} \quad Y_{\ddot{u}} := \frac{\partial Y}{\partial \ddot{u}}$$

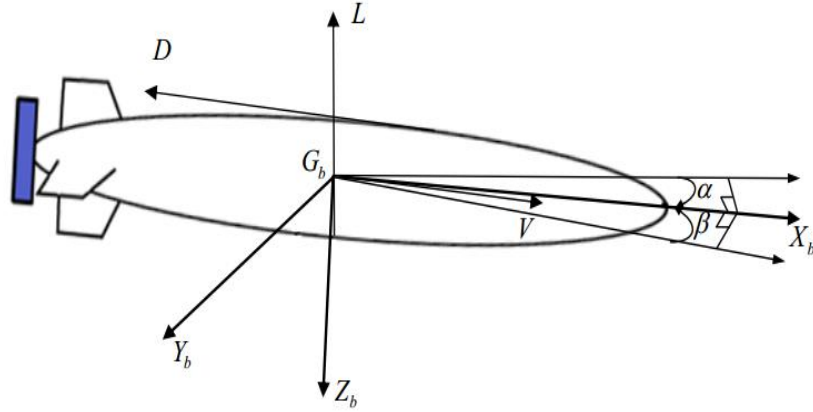
Với những ứng dụng điều khiển, có thể giả thiết rằng  $M_A > 0$  là hằng số dương. Điều này dựa trên giả thiết là  $M_A$  là độc lập với tần số sóng, đây là một giả thiết tốt đối với những ứng dụng điều khiển tần số thấp. Với những ứng dụng như hoạt động của phương tiện ngầm ở độ sâu lớn và tàu thủy ở vị trí cố định, chúng ta có thể giả thiết  $M_A$  là đối xứng. Ma trận Coriolis và lực hướng tâm thủy động lực học  $C_A(v)$  có thể được viết chi tiết như sau:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}} u + X_{\dot{v}} v + X_{\dot{\omega}} \omega + X_{\dot{q}} q + X_{\dot{r}} r & b_1 &= K_{\dot{u}} u + K_{\dot{v}} v + K_{\dot{\omega}} \omega + K_{\dot{q}} q + K_{\dot{r}} r \\ a_2 &= Y_{\dot{u}} u + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{\omega}} \omega + Y_{\dot{q}} q + Y_{\dot{r}} r & b_2 &= M_{\dot{u}} u + M_{\dot{v}} v + M_{\dot{\omega}} \omega + M_{\dot{q}} q + M_{\dot{r}} r \\ a_3 &= Z_{\dot{u}} u + Z_{\dot{v}} v + Z_{\dot{\omega}} \omega + Z_{\dot{q}} q + Z_{\dot{r}} r & b_3 &= N_{\dot{u}} u + N_{\dot{v}} v + N_{\dot{\omega}} \omega + N_{\dot{q}} q + N_{\dot{r}} r \end{aligned} \quad (1.24)$$

### 1.5.3. Các lực và mô men thủy động



Hình 1.9. Biểu diễn lực nâng, lực cản, góc tấn góc nâng của AUV

Lực cản liên quan đến mật độ nước  $\rho$ , tổng diện tích bề mặt  $A_f$  theo hướng vận tốc  $V$  của UAV (hình 1.9) [13];

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 \quad (1.25)$$

Trong đó,  $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ ;  $C_D$  liên quan đến góc tấn công ( $\alpha$ ) theo đường Parabol có dạng  $C_D = a\alpha^2 + b\alpha + c$  với  $a, b, c$  là các hằng số.

Giả sử rằng vận tốc  $v$  và  $w$  là nhỏ so với vận tốc  $u$ , góc tấn công  $\alpha$  có thể được mô tả trong mặt phẳng ngang  $X_b Z_b$  là  $\tan \alpha \approx \alpha = \frac{w}{u} [\text{rad}]$  và góc trượt bên  $\beta$  trong mặt phẳng đứng  $X_b Y_b$  được mô tả  $\tan \beta \approx \beta = \frac{v}{u} [\text{rad}]$ .

Tổng lực cản theo các trục  $X_b, Y_b, Z_b$  là:

$$\begin{cases} X_b = X_{u|u}|u| + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{vv}|v| + X_{w|w}|w| \\ Y_b = Y_{uv_d}uv + Y_{v|v}|v| \\ Z_b = Z_{uw_d}uw + Z_{w|w}|w| \end{cases} \quad (1.26)$$

Trong đó,

$$\begin{cases} X_{u|u} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)c; X_{uw} = X_{uv} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)b; X_{w|w} = X_{v|v} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)\left(a + \frac{c}{2}\right); \\ -Y_{v|v} = Z_{w|w} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)b; Z_{ww_d} = -Y_{uv_d} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)c \end{cases} \quad (1.27)$$

Lực nâng  $L$  tác động tại tâm áp lực tạo ra vuông góc với hướng dòng chảy khi AUV chuyển động trong nước (hình 1.10). Lực này đối với tâm nổi tạo ra mô men chúc ngóc  $M$ . Cả lực nâng và quay tỉ lệ thuận với các hệ số  $C_L, C_M$  liên quan đến góc tấn công  $\alpha$  và góc trượt bên  $\beta$  [16].

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L A_f V^2; M = \frac{1}{2}\rho C_M A_f V^2 \quad (1.28)$$

Lực nâng và chúc ngóc khi xét trong mặt phẳng  $X_b Z_b$  từ phương trình (1.21) ta có:

$$Z_1 = \frac{1}{2}\rho A_f C_{L\alpha} (u^2 + w^2) \alpha \cos \alpha \text{ với } C_{L\alpha} = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \quad (1.29)$$

$$M_1 = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M\alpha} (u^2 + w^2) \alpha \text{ với } C_{M\alpha} = \frac{\partial C_M}{\partial \alpha}$$

Tương tự trong mặt phẳng  $X_b Y_b$ :

$$Y_1 = \frac{1}{2}\rho A_f C_{L\beta} (u^2 + v^2) \beta \cos \beta; N_1 = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M\beta} (u^2 + v^2) \beta \quad (1.30)$$

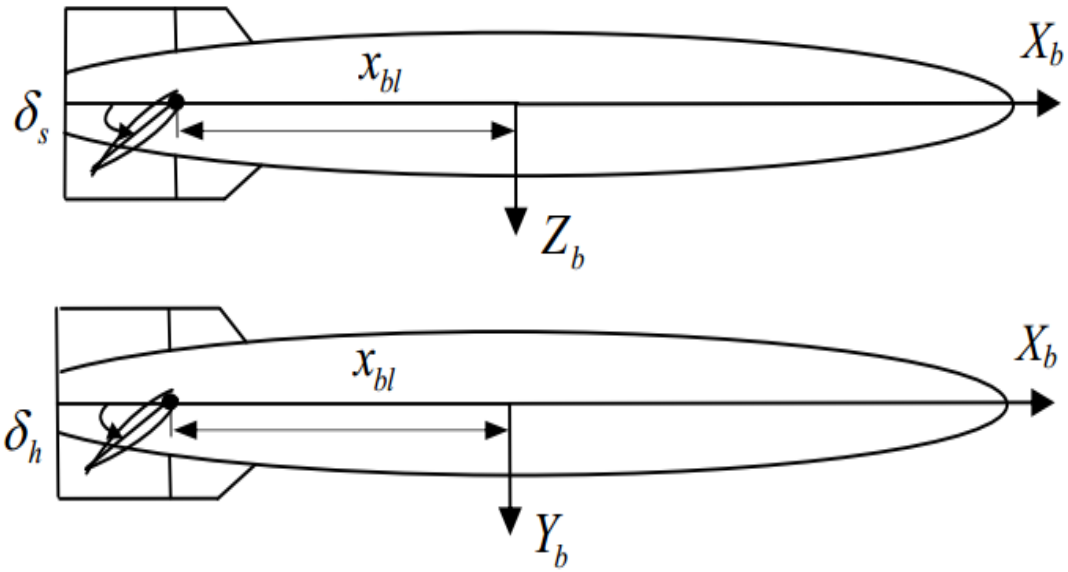
Giả sử rằng vận tốc  $u$  lớn hơn rất nhiều so với  $v$  và  $w$  ta có:

$$Y_{uv_i} = -Z_{uw_i} = \frac{1}{2}\rho A_f C_{L\alpha}; M_{uw_i} = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M\alpha} \quad (1.31)$$

Từ (1.27) đến (1.31) ma trận lực và mô men thủy động được mô tả:

$$D(\underline{v}) = \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{uv}u + X_{v|v}|v| & X_{uw}u + X_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uv_d}u + Y_{v|v}|v| + Y_{uv_1}u & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{uw_d}u + Z_{w|w}|w| + Z_{uw_i}u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{uw_i}u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{uv_i}u & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

#### 1.5.4. Các lực và mô men của bánh lái



Hình 1.10. Góc bề lái, bánh lái sâu và bánh lái hướng [9]

Hai bánh lái nằm ngang điều khiển AUV theo độ sâu hay góc chúc được quay bởi hai máy lái điện theo cặp, hai bánh đứng điều khiển AUV theo góc hướng và góc lắc được quay bởi hai máy lái điện độc lập, công thức thực nghiệm cho lực nâng và mô men của bánh lái [13]:

$$L_{bl} = \frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{bl}} S_{bl} \delta_e u^2; \quad M_{bl} = x_{bl} L_{bl} \quad (1.33)$$

Trong đó,  $C_{L\delta_{bl}}$  là tốc độ thay đổi hệ số lực nâng và  $S_{bl}$  là diện tích bề mặt của bánh lái.  $\delta_e (rad)$  là góc ảnh hưởng của bánh lái (hình 1.10).

Đối với bánh lái hướng, góc ảnh hưởng của bánh lái là  $\delta_e = \delta_h + \frac{v + x_{blh} r}{u}$ ,

đối với bánh lái sâu góc ảnh hưởng là  $\delta_e = \delta_s + \frac{w - x_{bls} q}{u}$ . Thông thường khoảng

cách từ trục các bánh lái hướng và bánh lái sâu đến tâm trọng lực là bằng nhau

$$x_{bl} = x_{blh} = x_{bls}.$$

Từ các phương trình lực nâng và mô men ta có hệ số thủy động theo các trục hệ tọa độ gắn liền:

$$\begin{cases}
X_l = -\frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{blh}} S_{blh} [u^2 \delta_l - uu + x_{bl} up] = X_{uu\delta_l} u^2 \delta_l + X_{uu_l} uu + X_{up_l} up \\
Y_h = \frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{blh}} S_{blh} [u^2 \delta_h + uv + x_{bl} ur] = Y_{uu\delta_h} u^2 \delta_h + Y_{uv_h} uv + Y_{ur_h} ur \\
Z_s = -\frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{bls}} S_{bls} [u^2 \delta_s - uw + x_{bl} uq] = Z_{uu\delta_s} u^2 \delta_s + Z_{uw_s} uw + Z_{uq_s} uq \\
K_l = \frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{blh}} S_{blh} x_{bl} [u^2 \delta_l - uu + x_{bl} up] = K_{uu\delta_l} u^2 \delta_l + K_{uu_l} uu + K_{up_l} up \\
M_s = -\frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{bls}} S_{bls} x_{bl} [u^2 \delta_s - uw + x_{bl} uq] = M_{uu\delta_s} u^2 \delta_s + M_{uw_s} uw + M_{uq_s} uq \\
N_h = -\frac{1}{2} \rho C_{L\delta_{blh}} S_{blh} x_{bl} [u^2 \delta_h + uv + x_{bl} ur] = N_{uu\delta_h} u^2 \delta_h + N_{uv_h} uv + N_{ur_h} ur
\end{cases} \quad (1.34)$$

Từ (1.33) thông số lực và mô men bánh lái theo các trục đối với hệ tọa độ gắn liền được viết dưới dạng ma trận:

$$L(\underline{v}) = \begin{bmatrix} X_{uu_l} u & 0 & 0 & X_{up_l} u & 0 & 0 \\ 0 & Y_{uv_h} u & 0 & 0 & 0 & Y_{ur_h} u \\ 0 & 0 & Z_{uw_s} u & 0 & Z_{uq_s} u & 0 \\ K_{uu_l} u & 0 & 0 & K_{up_l} u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{uw_s} u & 0 & M_{uq_s} u & 0 \\ 0 & N_{uv_h} u & 0 & 0 & 0 & N_{ur_h} u \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Lực và mô men của bánh lái theo các trục với hệ tọa độ gắn liền là:

$$\underline{\tau}_{bl} = \left( X_{uu\delta_l} \delta_l u^2, Y_{uu\delta_h} \delta_h u^2, Z_{uu\delta_s} \delta_s u^2, K_{uu\delta_l} \delta_l u^2, M_{uu\delta_s} \delta_s u^2, N_{uu\delta_h} \delta_h u^2 \right)^T \quad (1.36)$$

với,  $\delta_h = \delta_{h2} - \delta_{h1}$ ;  $\delta_l = \delta_{l2} + \delta_{l1}$  trong đó  $\delta_{h1}, \delta_{h2}$  là góc bề lái các bánh lái hướng;  $\delta_s = \delta_{s2} - \delta_{s1}$  trong đó  $\delta_{s1}, \delta_{s2}$  là góc bề lái các bánh lái sâu.

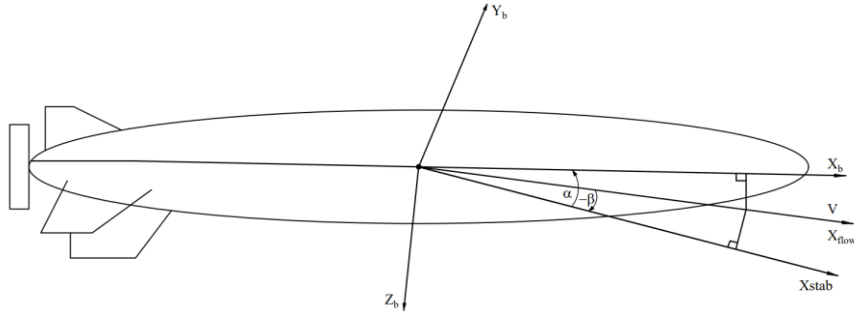
Lực đẩy thường không thay đổi đối với AUV có hệ động lực là động cơ chân vịt và được tính bằng:  $\underline{\tau}_{pl} = (X_{pl}, 0, 0, 0, 0, 0)^T$  (1.37)

## 1.6. Các yếu tố môi trường tác động lên phương tiện ngầm tự hành

AUV thường chuyển động ở độ sâu lớn nên chỉ xét đến sự ảnh hưởng của dòng chảy đại dương, ít xét đến ảnh hưởng của các yếu tố môi trường khác như sóng gió hay sự thay đổi nhiệt độ, mật độ nước. Theo lý thuyết dòng chảy dưới mặt nước thường chuyển động theo chiều ngang và chiều thẳng đứng được tạo

ra bởi lực trọng trường và sự biến thiên của mật độ nước ở các tầng khác nhau của hải dương. Dòng chảy đại dương này ảnh hưởng rất lớn đến hướng đi và tốc độ của AUV, có thể làm cho AUV đổi hướng đi và gây ra một hành trình ngầm không an toàn. Do vậy, cần nghiên cứu chính xác các thông tin và sự chuyển động của dòng hải lưu để kịp thời điều chỉnh hướng đi của phương tiện ngầm, định vị lại vị trí khi có sai số do dòng hải lưu gây ra.

Theo tài liệu [10], các nhà khoa học thường quy về hệ tọa độ FLOW khi xét đến ảnh hưởng của dòng chảy. Trong đó muốn chuyển từ hệ tọa độ FLOW sang hệ tọa độ BODY thường xác định bằng 2 phép quay đơn giản như sau: Từ trục dòng chảy  $x_{flow}$  quay góc dạt  $-\beta$  về phía trục  $z_b$  để tạo thành một trục mới gọi là trục ổn định  $x_{stab}$ . Sau đó từ trục ổn định này quay góc  $\alpha$  về phía trục  $y$  để tạo thành trục  $x_b$ . Khi đó góc  $\alpha$  gọi là góc tới.



Hình 1.11. Góc tới và góc dạt [10]

Các trục mới được biểu diễn trên hình, với các thành phần vận tốc của AUV được tính như sau:

$$\begin{cases} u = V \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ v = V \sin(\alpha) \\ w = V \sin(\alpha) \cos(\beta) \end{cases} \quad (1.38)$$

Khi phương tiện chuyển động ngầm AUV di chuyển tịnh tiến về phía trước với vận tốc  $V > 0$  nào đó, thì góc dạt và góc tới được tính toán theo công thức:

$$\begin{cases} \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) \\ \beta = \sin^{-1}\left(\frac{v}{V}\right) \end{cases} \quad (1.39)$$

Giả thiết góc  $\alpha, \beta$  đủ nhỏ, để tính gần đúng theo lý thuyết như sau:

$$u \approx V, v \approx \beta V, w \approx \alpha V, \alpha \approx \frac{w}{V}, \beta \approx \frac{v}{V} \quad (1.40)$$

Vì phân theo thời gian với giả thiết vận tốc của AUV và dòng chảy là hằng số không đổi, suy ra trượt ngang của AUV là:

$$\dot{v} = V \cos(\beta) \dot{\beta} \quad (1.41)$$

$$\text{Khi vận tốc } V > 0 \text{ suy ra: } \dot{\beta} = \frac{1}{V \cos(\beta)} \dot{v} \quad (1.42)$$

Thông qua vận tốc chuyển động tương đối có thể tính được ảnh hưởng của dòng chảy đến tốc độ của AUV theo công thức:

$$V_r = V_0 - V_d \quad (1.43)$$

Trong đó vận tốc tương đối được kí hiệu là  $V_r$ , Vận tốc phương tiện chuyển động ngầm kí hiệu là  $V_0$  và vận tốc dòng chảy kí hiệu là  $V_d$ .

Như vậy thành phần vận tốc theo các trục có thể viết lại như sau:

$$\begin{cases} u_r = u_0 - u_d \\ v_r = v_0 - v_d \\ w_r = w_0 - w_d \end{cases} \quad (1.44)$$

Với  $V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2 + w_r^2}$ , suy ra góc dạt và góc tới tương đối trong trường hợp này như sau:

$$\begin{cases} u_r = V_r \cos(\alpha_r) \cos(\beta_r) \\ v_r = V_r \sin(\alpha_r) \\ w_r = V_r \sin(\alpha_r) \cos(\beta_r) \end{cases} \quad (1.45)$$

Tương tự cách tính toán như công thức 1.39, suy ra:

$$\begin{cases} \alpha_r = \tan^{-1}\left(\frac{w_r}{u_r}\right) \\ \beta_r = \sin^{-1}\left(\frac{v_r}{V_r}\right) \end{cases} \quad (1.46)$$

Tương tự công thức 1.45 với giả thiết góc  $\alpha, \beta$  nhỏ tính được:

$$u_r \approx V_r, v_r \approx \beta_r V_r, w_r \approx \alpha_r V_r, \alpha_r \approx \frac{w - w_r}{V_r}, \beta_r = \frac{v - v_r}{V_r} \quad (1.47)$$

Phương trình tổng quát các lực thủy động học của vật rắn được viết lại như sau:

$$\underbrace{M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v}_{\text{các số hạng vật thể rắn}} + \underbrace{M_A \dot{v}_r + C_A(v_r)v_r + D(v_r)v_r}_{\text{các số hạng thủy động học}} + \underbrace{g(\eta)}_{\text{các hạng thủy tĩnh học}} = \tau \quad (1.48)$$

Khi đó  $\dot{v}_d \approx 0$  và  $\dot{v}_r \approx 0$  vector vận tốc dòng chảy biến đổi chậm. Vì vậy, phương trình chuyển động dòng chảy trở thành:

$$M \dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v_r)v_r + D(v_r)v_r + g(\eta) = \tau \quad (1.49)$$

Vận tốc dòng chảy  $V_d$  thường được định nghĩa trong hệ tọa độ cố định trên trái đất với các trục dòng chảy, nghĩa là  $[V_d, 0, 0]^T$  sao cho vận tốc dòng chảy được định hướng theo trục x. Biến đổi từ các trục dòng chảy sang các vận tốc ba chiều có thể được thực hiện bằng cách định nghĩa  $\alpha_d$  là góc tới của dòng chảy và  $\beta_d$  là góc dạt do dòng chảy. Vận tốc dòng chảy ba chiều (3D) được tính bằng cách thực hiện nguyên lý hai phép quay:

$$\begin{bmatrix} u_d^n \\ v_d^n \\ w_d^n \end{bmatrix} = R_{y, \alpha_d}^T R_{z, -\beta_d}^T \begin{bmatrix} V_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Trong đó, các ma trận quay  $R_{y, \alpha_d}^T$  và  $R_{z, -\beta_d}^T$  được định nghĩa như sau:

$$R_{z, -\beta_d} = R_{z, -\beta_d}^T = \begin{bmatrix} \cos \beta_d & \sin \beta_d & 0 \\ -\sin \beta_d & \cos \beta_d & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

Khai triển (1.50) và (1.51), tính được:

$$u_d^n = V_d \cos \alpha_d \cos \beta_d \quad (1.52)$$

$$v_d^n = V_d \sin \beta_d; \quad (1.53)$$

$$w_d^n = V_d \sin \alpha_d \cos \beta_d \quad (1.54)$$

Sử dụng ma trận quay theo góc Euler để biến đổi vận tốc dòng chảy ba chiều thành vận tốc cố định trên vật thể như sau:

$$\begin{bmatrix} u_d^b \\ v_d^b \\ w_d^b \end{bmatrix} = R_b^n(\Theta)^T \begin{bmatrix} u_d^n \\ v_d^n \\ w_d^n \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

Từ trường hợp 2D, các phương trình từ (1.52) - (1.54) với  $\alpha_d = 0$ , có thể đơn giản thành:

$$u_d^n = V_d \cos \beta_d; \quad (1.56)$$

$$v_d^n = V_d \sin \beta_d \quad (1.57)$$

Trong mặt phẳng nằm ngang không sử dụng thành phần  $w_d^n$ . Do vậy, công thức (1.56) và (1.57) có thể đơn giản thành:

$$u_d^b = V_d \cos(\beta_d - \varphi); \quad (1.58)$$

$$v_d^b = V_d \sin(\beta_d - \varphi) \quad (1.59)$$

Để xử lý độ lệch do dòng chảy gây ra đối với phương tiện chuyển động ngầm thì công thức (1.58) và công thức (1.59) có thể đưa vào thuật toán để tính toán cho ra tín hiệu điều khiển [10].

### 1.7. Tình hình nghiên cứu AUV trên thế giới

AUV là thiết bị ngầm tự hành có thể hoạt động độc lập, cho nên AUV hứa hẹn nhiều tiềm năng phát triển hiệu quả trong nhiều hoạt động như thăm dò và khai thác khoáng sản hay nghiên cứu khoa học cũng như các ứng dụng quân sự và dân sự [16], [17]. Trong đó các ứng dụng tiềm năng của AUV bao gồm thăm dò tài nguyên dầu và khí đốt, xây dựng các công trình ngoài khơi [18], giám sát hệ sinh thái đại dương [19], khảo sát và lập bản đồ đáy biển, kiểm tra điều kiện đường ống. Về mặt nghiên cứu khoa học, AUV có thể được sử dụng để thu thập dữ liệu phục vụ điều tra thủy văn và giám sát các thông số môi trường đối với khoa học địa chất biển. Quan trọng hơn, AUV được sử dụng rộng rãi trong quốc phòng bao gồm khảo sát, cứu hộ hoặc rà phá thủy lôi do kẻ thù cài đặt [20]. Do đó, AUV đã khẳng định được vị thế và tầm quan trọng của mình trong rất nhiều các lĩnh vực khác nhau đã thu hút sự đầu tư và nghiên cứu của các nước trên thế giới, tuy nhiên môi trường dưới nước không thể đoán trước được, nơi có nhiều

hiều động bên ngoài không thể tránh khỏi. Một trong những vấn đề cơ bản của AUV là làm thế nào để điều chỉnh chuyển động của nó một cách hiệu quả và bám quỹ đạo đặt trước trong điều kiện môi trường môi trường đại dương có những thành phần bất định không thể đoán trước cần yêu cầu thể hiện chính xác ở cả quy mô không gian và thời gian [20]. Việc kiểm soát chuyển động của AUV thậm chí còn khó khăn hơn do hệ thống cơ điện bên trong phức tạp và các nhiễu động bên ngoài không thể tránh khỏi bao gồm cả nhiễu do các dòng hải lưu [21]. Nói cách khác, trong những điều kiện đó, nhiễu thông số trong hệ thống AUV không thể xác định chính xác, điều đó gây khó khăn cho việc thiết kế bộ điều khiển. Hơn nữa, bản thân AUV là cơ cấu thiếu chấp hành nghĩa là số lượng đầu vào điều khiển ít hơn số lượng đầu ra điều khiển [22]. Do vậy việc thiết kế bộ điều khiển cho AUV là một nhiệm vụ nhiều khó khăn và thách thức [23], [24].

Trong tài liệu [16] nhóm tác giả của công trình nghiên cứu đã khẳng định những vấn đề gặp phải khi thiết kế bộ điều khiển cho phương tiện ngầm tự hành AUV, nghiên cứu đã tách điều khiển chung thành ba phần phụ để điều khiển là lái, lặn và điều khiển tốc độ. Trong mỗi bài toán con đó, một số phương trình trong mô hình toán được tuyến tính hóa để giảm tương tác lẫn nhau, do đó đơn giản hóa việc thiết kế các bộ điều khiển. Như trong công trình này nhóm tác giả trình bày về mô hình tàu 6 DOF và khả năng ứng dụng của AUV sau đó tập trung về nghiên cứu bài toán điều khiển độ sâu (bài toán điều khiển lặn) cho AUV còn các vấn đề liên quan nhóm tác giả kế thừa trong các nghiên cứu khác. Như thế bài toán chưa thể hiện hết tính tổng quát và sự ảnh hưởng của phương trình trục này sang trục kia mặc dù nhóm tác giả đã đưa cả bộ quan sát NDO trong nghiên cứu của mình. Bên cạnh đó, do đặc tính thủy động lực học, các phương trình chuyển động của AUV có tính phi tuyến nên không thể tránh khỏi sai số của mô hình trong quá trình tuyến tính hóa [16].

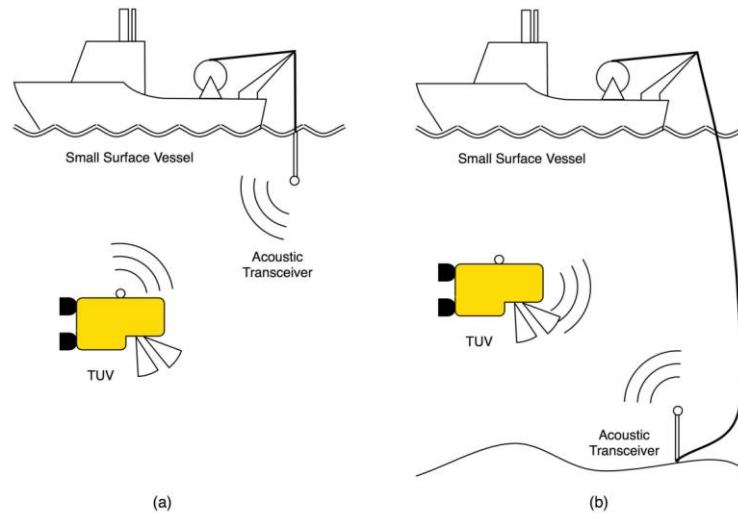
Cụ thể, trong lĩnh vực khoa học là khảo sát, thu thập dữ liệu và lấy mẫu môi trường phục vụ thủy văn nghiên cứu (Wynn, 2014; Eichhorn và cộng sự, 2018); Công trình đã khẳng định được tầm quan trọng của AUV trong quá trình

tham gia lập bản đồ đáy biển và giám sát. Hay lồng ghép với quá trình lấy mẫu và kiểm tra thực tế để thu thập dữ liệu ở các vùng nước sâu. Việc tiếp tục phát triển các phương tiện chuyển động ngầm ngày càng đa dạng được trang bị các cảm biến mới đã làm tăng phạm vi ứng dụng khoa học địa chất biển, đồng thời tiên bộ trong trí tuệ nhân tạo cũng tăng độ tin cậy và tính linh hoạt. AUV có khả năng đưa ra quyết định cho phép tránh va chạm dưới đáy biển hoặc va chạm dưới băng, và những phương tiện này ngày càng được phát triển với điều khiển thông minh để AUV có thể điều chỉnh theo vai trò nhiệm vụ riêng biệt trong thăm dò và giám sát đáy đại dương. Công trình một lần nữa khẳng định vai trò to lớn của AUV trong các ứng dụng cụ thể [13].

Trong quân đội việc rà phá thủy lôi do địch gài trên biển, tiến hành các hoạt động chiến tranh với hải quân (Hagen và cộng sự, 2003; Mondal và cộng sự, 2019); Công trình nghiên cứu đã khẳng định AUV có thể tìm kiếm, cũng như phát hiện và loại bỏ các loại mìn hải quân trên các tuyến đường biển quan trọng với khả năng hoạt động tự động, tiếp cận các khu vực nguy hiểm và thực hiện nhiệm vụ xử lý mìn một cách an toàn. Ngoài ra AUV có thể được sử dụng để tìm kiếm, theo dõi và định vị để thu thập thông tin về hoạt động và vị trí của tàu ngầm đối phương một cách chính xác, bí mật hoặc có thể được sử dụng để tiến hành các cuộc tấn công từ xa trên biển mà không phải tiếp xúc trực tiếp với kẻ thù, thu thập thông tin tình báo, theo dõi các hoạt động của tàu địch [20].

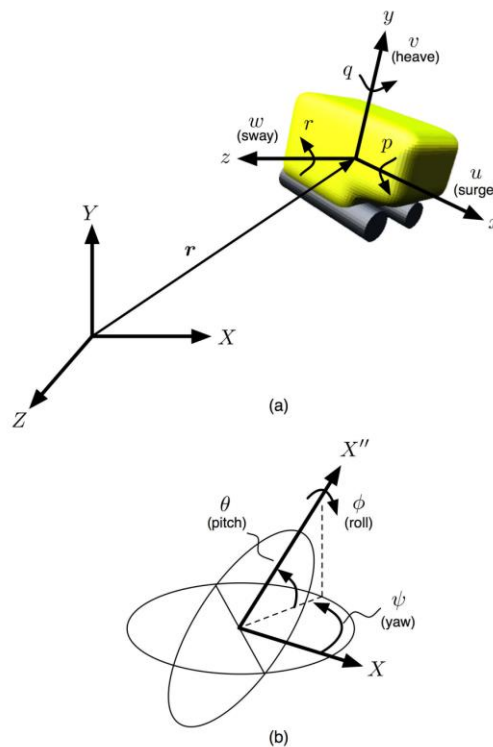
Công trình [14] trình bày về phương tiện dưới nước Tetherless underwater vehicle (TUV) là ROV và AUV, khẳng định ưu điểm của AUV là có thể hoạt động ở độ sâu lớn hơn cũng như di chuyển xa hơn so với ROV. Do không bị ràng buộc bởi cáp điều khiển nên AUV có thể tiếp cận các vùng biển khó tiếp cận thám hiểm và những khu vực chưa được khám phá trước đó. Trong công trình này nhóm tác giả đề cập đến bộ điều khiển phương tiện ngầm tự hành từ tàu nổi trên mặt nước có tính đến yếu tố thời gian thực, từ đó đề xuất bộ điều khiển có tính đến độ trễ thời gian có thể cài đặt trên tàu mẹ để điều khiển mà không cần cấu hình thủ công lại phương tiện ngầm. Với AUV điều khiển từ tàu mẹ trên mặt nước thường có 2 cách là tàu nổi có thể kéo theo hệ thống thu phát

liên lạc (hình 1.12.a), hai là tàu nổi được kết nối với hệ thống thu phát thông qua dây cáp điều khiển (hình 1.12.b)



Hình 1.12. TUV điều khiển theo tín hiệu thu phát [14]

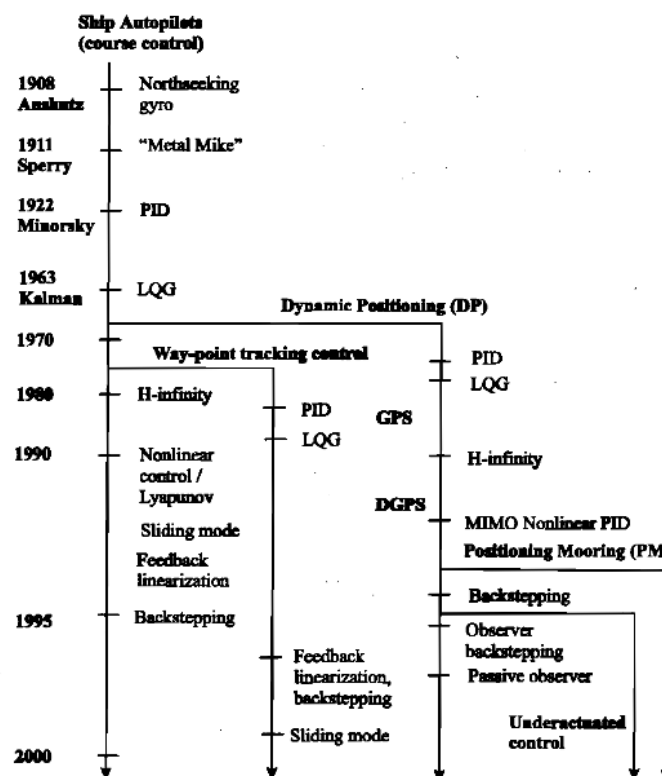
Công trình trình bày về mô hình AUV 6 DOF cho phép mô phỏng chính xác các chuyển động và tương tác của AUV trong không gian 3D. Điều này giúp hiểu rõ hơn về cách AUV di chuyển và tương tác với môi trường dưới nước, có thể điều chỉnh và kiểm soát chính xác hướng, góc nghiêng, và chuyển động của AUV trong quá trình hoạt động [14].



Hình 1.13. Hệ tọa độ mô tả chuyển động của TUV [14]

Hình 1.13 mô tả mô hình TUV 6 DOF với các hệ trục tọa độ (hình 1.13a) và phân tích góc nghiêng TUV theo trục X (hình 1.13b) là tiền đề cho việc sử dụng để đào tạo và giảng dạy về điều khiển cho AUV sau này. Các nghiên cứu có thể tạo ra các tình huống mô phỏng và huấn luyện người điều khiển trong việc điều khiển TUV và xử lý các tình huống bất thường trong môi trường nước. Như vậy có thể khẳng định tầm quan trọng của TUV trong việc mô phỏng, điều khiển, và phân tích tương tác của phương tiện chuyển động ngầm trong môi trường nước [14].

Trong công trình của T. I. Fossen, (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles* tác giả đã thống kê một số bộ điều khiển bắt đầu từ điều khiển sơ khai nhất khi xuất hiện con quay vi cơ là điều kiện tạo ra vòng phản hồi kín năm 1908 đến một số bộ điều khiển phát triển ở khoảng những năm 2000 (hình 1.14) như bộ điều khiển Feedback, Sliding mode, Backstepping. Trong đó Fossen luôn đề cập đến vấn đề làm mới mô hình nghiên cứu nâng cao của riêng mình phù hợp với lĩnh vực nghiên cứu làm sao cho mô hình đơn giản và hiệu quả nhất [16].



Hình 1.14. T. I. Fossen thống kê các bộ điều khiển [16]

T. I. Fossen là tác giả lớn, có nhiều công trình nghiên cứu về tàu biển, ngoài cuốn sách này tác giả còn rất nhiều công trình và một số cuốn sách khác cũng được các nhà khoa học quan tâm đến ngày hôm nay. Những giá trị mà công trình này mang lại cho nghiên cứu khoa học là rất lớn như các mô hình động lực học cho tàu biển, hay một số mô hình nhiễu điện hình được sử dụng rất nhiều cho các công trình sau này. Tuy nhiên các bộ điều khiển mà tác giả tổng kết chủ yếu sử dụng cho phương tiện tàu thủy, phương tiện chuyển động ngầm ít hơn và không quan tâm nhiều đến các nhiễu phi tuyến tác động đến mô hình, mặc dù các tàu biển thực tế vẫn sử dụng các nghiên cứu này để thiết kế lái tự động vì tính đơn giản và yêu cầu không quá cao về độ chính xác. Do vậy các nghiên cứu này cần phải được tổng kết và phát triển theo hướng hiện đại để nâng cao độ chính xác dẫn đường cho tàu biển nói chung. AUV nói riêng, là động lực cho các nhà công trình nghiên cứu sau này [16].

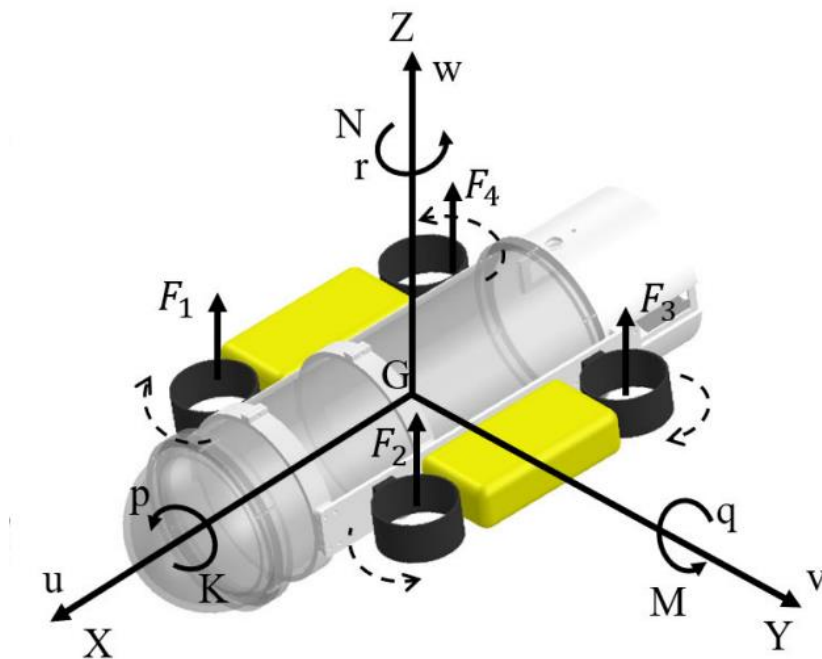
Khi xây dựng các bộ điều khiển cho AUV thường sử dụng các tham số tính toán không chính xác và thay đổi. Do đó, bộ điều khiển phải có khả năng tự điều chỉnh để phù hợp với sự thay đổi các thông số của AUV. Các nghiên cứu trước đây thường sử dụng phương pháp điều khiển tuyến tính hơn là phương pháp điều khiển phi tuyến (do việc áp dụng dễ dàng hơn). Tuy nhiên khi tuyến tính hóa hệ phi tuyến thường phải lược bớt các thông số hoặc phải đơn giản hóa các thông số dẫn đến việc áp dụng mô hình mô phỏng với mô hình thực tế sẽ có những sai số nhất định. Các đặc tính động học của AUV khá phức tạp do tính phi tuyến cao, các lực thủy động học thay đổi theo thời gian, các hệ số thủy động lực học không ổn định và nhiễu do dòng chảy, sóng ngầm. Để không ngừng đáp ứng yêu cầu về dẫn đường cho các phương tiện ngầm các nhà khoa học ở các quốc gia trên thế giới đã triển khai nghiên cứu nhiều phương pháp để nâng cao độ chính xác hệ thống dẫn đường quán tính phục vụ cho dẫn đường tàu ngầm. Các nghiên cứu tập trung vào cải tiến con quay, nghiên cứu các phương pháp kết hợp giữa hệ thống dẫn đường quán tính và các phương pháp xác định vị trí khác nhằm nâng cao chất lượng hệ thống dẫn đường quán tính và phục vụ dẫn đường cho phương tiện ngầm [25], [26].

Ví dụ, tác giả của công trình [25] đã đề xuất khai thác bộ điều khiển đạo hàm tỷ lệ-tích phân (PID) [26] để điều khiển độ sâu của AUV Delphin2, trong đó các tham số của luật điều khiển được xác định bằng cách sử dụng kỹ thuật Ziegler-Nichols. Tuy nhiên, đối tượng hoạt động ở môi trường nước chịu tác động của các yếu tố không biết trước như dòng chảy, sóng ngầm, mật độ, nhiệt độ nước và một số thông số trong bản thân AUV không được tính toán chính xác, đặc tính động học của đối tượng không phải theo thời gian như nhiên liệu bị tiêu tốn, trọng lượng, vị trí trọng tâm thay đổi. Như vậy, mô hình động học xây dựng nhận dạng được không thể hiện chính xác mô hình thực của đối tượng. Vì thế, một bộ điều khiển PID truyền thống với các thông số của bộ điều khiển cố định không đủ linh hoạt để điều khiển AUV nếu sai số mô hình động học và sự ảnh hưởng của các yếu tố môi trường quá lớn.

Bộ điều khiển PID được ứng dụng rộng rãi vào khoảng những năm 1960 khi những năm đầu của thập niên 70, giá nhiên liệu trên thế giới tăng, 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 thiểu giá thành vận chuyển. Dẫn đến phát triển các công trình công bố dựa trên điều khiển tối ưu toàn phương (LQR hoặc LQG) [27]. 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 nhiều môi trường. Do vậy lý thuyết điều khiển thích nghi được quan tâm nghiên cứu nhiều hơn cho các hệ thống hiện nay [28]. 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 và hàm điều khiển thích nghi Lyapunov cho hệ thống lái tàu. 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.

Mô hình AUV 6 DOF là một mô hình chi tiết và phức tạp hơn so với mô hình AUV 4 DOF. Mô hình AUV 6 DOF bao gồm sáu bậc tự do để mô phỏng chính xác chuyển động của AUV trong không gian 3D, trong khi mô hình AUV 4 DOF chỉ có bốn bậc tự do được tạo ra từ mô hình AUV 6 DOF bằng cách giới

hạn một số bậc tự do. Trong trường hợp này, AUV chỉ có thể di chuyển theo các chuyển động quanh trục Z (Yaw) và chuyển động dọc (Surge). Giới hạn chuyển động quanh trục X (Roll) và trục Y (Pitch): Nếu chỉ giữ cho AUV duy trì một góc nghiêng cố định và chỉ cho phép chuyển động quanh trục Z (Yaw), các nghiên cứu có thể tạo ra mô hình AUV 4 DOF. Mô hình AUV 4 DOF thường được sử dụng trong những ứng dụng đơn giản hơn, nơi các chuyển động xoay (Roll) và quay (Yaw) không quan trọng hoặc không cần thiết. Và phương tiện ngầm là hình thoi chuyển động chủ yếu gần bề mặt nước nên ít bị ảnh hưởng bởi các lực sóng dọc ngầm sâu dưới đáy biển mà chủ yếu bị ảnh hưởng của sóng ngang. Điều này giúp giảm độ phức tạp của mô hình và quá trình điều khiển AUV. Trong đó nghiên cứu có nhắc đến phương tiện chuyển động ngầm theo mô hình Quadrotor UAV hay gọi là QUV, các Quadrotor tận dụng tối đa mối quan hệ và tốc độ quay của 4 cánh quạt để đạt được chuyển động 6 DOF. Bằng cách tăng tốc độ của  $F_3$  và  $F_4$  lên như nhau đồng thời giảm tốc độ của  $F_1$  và  $F_2$  thì lực nâng phía sau lớn hơn lực nâng phía trước và QUV nổi lên. Tương tự, bằng cách giảm tốc độ của  $F_1$  và  $F_4$  như nhau và tăng tốc độ của  $F_2$  và  $F_3$  như nhau QUV sẽ quay sang phải; mặt khác, bằng cách tăng tốc độ của  $F_1$  và  $F_4$  đồng thời giảm tốc độ của  $F_2$  và  $F_3$ , QUV sẽ quay sang trái như hình 1.15 [29].



Hình 1.15. Cấu hình của AUV quadrotor [29]

Gần đây một số nghiên cứu đã đề xuất 1 mô hình cho AUV cỡ nhỏ 4 bậc tự do và bỏ 2 bậc tự do là : Góc  $\theta$  (chuyển động quay lật) và góc  $\phi$  (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). Mục đích để đơn giản hóa trong quá trình điều khiển mà vẫn đảm bảo được yêu cầu nhiệm vụ đặt ra. Đây cũng là hướng nghiên cứu của NCS và tập thể giảng viên hướng dẫn hướng tới. Nhằm ứng dụng những thuật toán điều khiển mới nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho phương tiện ngầm tự hành AUV [17].

### **1.8. Những nghiên cứu AUV trong nước**

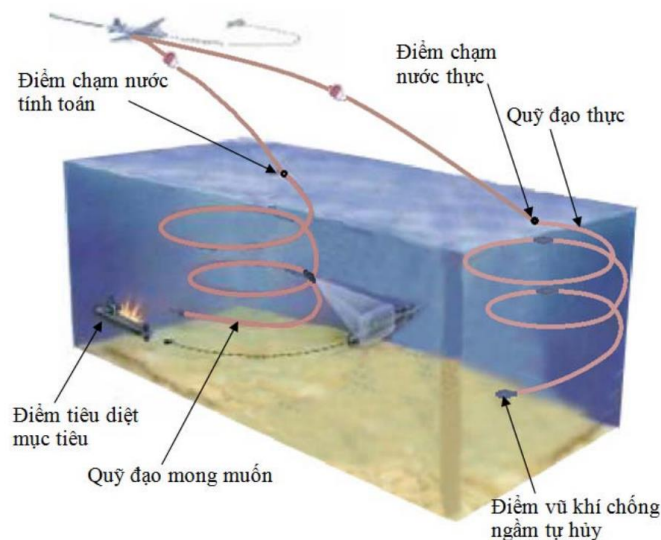
Ở nước ta, các công trình nghiên cứu, chế thử các phương tiện AUV rất ít về số lượng và chưa được tổ chức một cách bài bản, trong đó có một vài sản phẩm chưa được hội đồng khoa học đánh giá như sản phẩm tàu ngầm Hoàng Sa do ông Đỗ Quốc Hòa ở Thái Bình hay tàu ngầm mini phục vụ du lịch của ông Phan Bội Trân ở Thành phố Hồ Chí Minh .... Hiện nay nước ta chủ yếu nghiên cứu và chế tạo các thiết bị lặn không người lái điều khiển từ xa (ROV) phục vụ một số mục đích cụ thể như thăm dò đáy biển, khảo sát chân đế công trình biển,... Các tàu lặn có người lái phần lớn đều phải thuê của nước ngoài. Mới đây nhất là công trình AUV Dolphin do nhóm nghiên cứu của Đại học Bách khoa Hà Nội đứng đầu nhóm nghiên cứu là PGS.TS Trương Việt Anh Công bố tại triển lãm "Ứng dụng khoa học, công nghệ trong doanh nghiệp" tại Trung tâm Hội nghị Quốc gia 12/2019. Tàu chỉ lặn sâu được khoảng 50m nhưng có ý nghĩa rất lớn khi khẳng định Việt Nam có thể tham gia vào công nghiệp chế tạo thiết bị ngầm AUV này phục vụ rất nhiều mục tiêu cả trước mắt và dài hạn.

Gần đây Hải Quân Việt Nam nhận 6 chiếc tàu ngầm Kilo đặt mua từ Nga chủ yếu phục vụ mục đích quốc phòng an ninh. Tuy nhiên ngay cả Bộ Quốc phòng cũng chỉ nhận chuyển giao công nghệ về tàu ngầm chứ cũng chưa có những công bố khoa học chuyên sâu hay các hội thảo chuyên ngành liên quan đến thiết kế bộ điều khiển cho phương tiện chuyển động ngầm, công trình được công bố của Đại tá PGS.TS Phạm Nhật Hồng Nghiên cứu thiết kế thiết bị thủy

âm liên lạc [2] nằm trong đề tài lớn Nghiên cứu ứng dụng một số cảm biến siêu âm để thiết kế chế tạo hệ thống phát hiện, đo đạc các tham số vật bay trên không và thiết bị truyền tin dưới nước phục vụ kinh tế - xã hội, An ninh – quốc phòng. Công trình này khẳng định được tầm quan trọng của thiết bị truyền tin dưới nước đối với dẫn đường định vị phương tiện ngầm nhưng chưa có nghiên cứu liên kết được giữa dẫn đường và điều khiển.

Luận án Tiến sĩ của tác giả Nguyễn Đông [7], Đại học Bách Khoa Hà nội nghiên cứu về *“Phân tích thủy động lực học và thiết kế hệ thống điều khiển theo công nghệ hướng đối tượng cho phương tiện tự hành dưới nước”*; nghiên cứu này tập trung vào việc tính toán thủy động lực học phương tiện tự hành dưới nước (AUV) loại nhỏ và áp dụng công nghệ hướng đối tượng trong phát triển hệ thống điều khiển bám hướng trên mặt ngang với bộ điều khiển PID tuyến tính đơn giản. Hay công trình *“Nghiên cứu phương pháp hướng đối tượng trong phân tích và thiết kế điều khiển chuyển động cho thiết bị tự hành AUV/ASV với chuẩn SysML-Modelica và Automate lai”* [8]; đã xây dựng được các thành phần phân tích, thiết kế và thực thi hướng đối tượng trong điều khiển chuyển động cho AUV/ASV bằng công nghệ hệ thống hướng mô hình kết hợp với ngôn ngữ mô hình hóa hệ thống, ngôn ngữ mô phỏng *Modelica* và *automate* lai. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên đây chỉ đề cập đến bộ điều khiển chuyển động bám hướng của phương tiện ngầm tự hành cỡ nhỏ mà không có sự kết hợp với hệ thống dẫn đường quán tính trong dẫn đường ngầm dưới nước.

Luận án Tiến sĩ của tác giả Trương Duy Trung [9], Viện khoa học và công nghệ quân sự nghiên cứu về *“Xây dựng thuật toán dẫn đường và điều khiển cho phương tiện ngầm”* nghiên cứu đã tập trung vào tính toán dẫn đường và điều khiển cho phương tiện chuyển động ngầm dạng ngư lôi có trang bị thiết bị dẫn đường quán tính không để cho 2 giai đoạn là quá trình rơi trong khí quyển và quá trình chuyển động ngầm. Trong đó tập trung vào thuật toán ước lượng tham số bằng phương pháp bình phương tối thiểu đệ quy, hồi tiếp đầu ra nơ ron mờ thích nghi trực tiếp cho ngư lôi 4 DOF đủ cơ cấu chấp hành.



Hình 1.16. Quỹ đạo chuyển động của ASWs khi thả từ máy bay [9]

Trong luận án Tiến sĩ của tác giả Nguyễn Quang Huy [10], Trường đại học Hàng hải Việt Nam năm 2020 nghiên cứu về “*Nâng cao độ chính xác dẫn đường cho tàu ngầm hoạt động trong khu vực Biển đông*” Nghiên cứu về hệ thống hóa cơ sở lý luận của hệ thống dẫn đường quán tính, là hệ thống dẫn đường chính được sử dụng trên tàu ngầm. Tạo cơ sở khoa học và các yêu cầu kỹ thuật cũng như kỹ năng trong công tác huấn luyện, xử lý và nhập liệu thông tin phục vụ hiệu chỉnh hệ thống dẫn đường quán tính bảo đảm công tác xác định vị trí tàu ngầm, nâng cao độ chính xác dẫn đường của tàu ngầm trong khu vực Biển Đông.

Gần đây nhất vào năm 2022 [12] Nguyễn Văn Tuấn đã trình bày trong luận án tiến sĩ kỹ thuật cơ khí tại Đại học Bách Khoa Hà Nội, công trình nghiên cứu và phát triển phương tiện ngầm tự hành AUV có bổ sung năng lượng phù hợp với điều kiện vùng biển tại Việt Nam. Xây dựng mô hình thủy động học thiết bị lặn tự hành S-AUV, tối ưu lựa chọn hình dáng thiết bị lặn. Với mô hình S-AUV cỡ nhỏ có thể bỏ đi hai bậc tự do để lựa chọn phương trình chuyển động 4 bậc tự do cho mô hình S-AUV từ mô hình 6 bậc tự do. Xây dựng thành công bộ điều khiển trượt tầng cho mô hình thiết bị lặn S-AUV mới với các thông số mô hình được xác định bằng phân tích, mô phỏng số, chọn lựa dựa trên mô hình thực tế. Do vậy luận án mới chỉ tập trung nghiên cứu động học thiết bị lặn có bổ sung năng lượng mặt trời với cánh năng lượng linh hoạt có thể đóng mở, kết hợp với giải thuật điều khiển trượt tầng HSMC để nâng cao chất lượng điều khiển lái hướng và độ sâu lặn ở trường hợp mô phỏng bằng phần mềm. Trong đó tác giả

có sử dụng mô hình AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành có cánh năng lượng mặt trời và thử nghiệm ở các vùng biển khác nhau để đánh giá chất lượng điều khiển. Đây là một trong những định hướng về mô hình AUV cỡ nhỏ mà NCS quan tâm nghiên cứu điều chỉnh độ sâu và truyền động ứng dụng thuật toán điều khiển hiện đại cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành.

**Kết luận chương 1:** Trong chương này NCS trình bày về lý do chọn đề tài, mục tiêu khoa học. Giới thiệu về mô hình động lực học của phương tiện chuyển động ngầm nói chung và AUV nói riêng, phân tích các đặc điểm của đối tượng AUV 6 DOF. Bước đầu hiểu biết về đối tượng và một số công trình khoa học đã nghiên cứu trước đó để nêu nên quan điểm và nhận xét của mình. Từ đó định hướng nghiên cứu AUV lặn tự hành 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành với kỹ thuật điều khiển hiện đại tạo thành một hệ thống kín nhằm cải thiện chất lượng điều khiển cho AUV có thành phần bất định dạng hàm số. Việc phân tích trong chương này cho phép NCS rút ra kết luận sau:

1.AUV (Autonomous Underwater Vehicles) là đối tượng hoạt động trong môi trường nước chịu tác động của các yếu tố không biết trước như độ sâu, áp suất, dòng hải lưu, không được tính toán chính xác, ngay cả đặc tính động học của đối tượng cũng theo thời gian như nhiên liệu bị tiêu hao, trọng lượng tàu, vị trí trọng tâm tàu thay đổi. Điều khiển nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của AUV đòi hỏi phải sử dụng lý thuyết điều khiển phi tuyến hiện đại.

2.Phương tiện chuyển động ngầm hiện nay chủ yếu được nghiên cứu với phương trình chuyển động 6 DOF. Các công trình về phương tiện chuyển động ngầm 4 DOF cho các phương tiện ngầm cỡ nhỏ thường hướng đến thuật toán điều khiển đủ cơ cấu chấp hành. Các nghiên cứu về hệ thiếu cơ cấu chấp hành chủ yếu cho tàu thủy mặt nước, AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành chưa được công bố nhiều trong các công trình khoa học. Do đó trong luận án này NCS tập trung tiếp cận hai xu hướng điều khiển thiếu cơ cấu chấp hành: Một là cố gắng đưa về dạng đủ cơ cấu chấp hành khi thiết kế bộ điều khiển cho các trạng thái đủ cơ cấu chấp hành, sau đó áp dụng tín hiệu điều khiển này cho hệ thiếu chấp hành ban đầu (bộ điều khiển Backstepping và Backsepping Fuzzy). Hai là thiết kế bộ điều khiển trực tiếp cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành (HSMC và HSMC mờ-ron). Đây chính là tiền đề để định hướng cho những đóng góp mới được thực hiện trong luận án.

## **Chương 2.**

### **ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING THÍCH NGHI MỜ ĐẢM BẢO BÁM QUỶ ĐẠO CHO AUV 4 DOF THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH**

Hiện nay phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV thường được chia làm 4 hướng nghiên cứu chính: Nghiên cứu, điều chỉnh độ sâu và truyền động của phương tiện chuyển động ngầm; Nghiên cứu kết cấu khoan lặn và dụng cụ, thiết bị tìm kiếm phát hiện vật thể dưới nước; Đo đạc địa lý, địa chấn học chuyên dụng cho vùng ngập nước; Nghiên cứu thiết bị nâng hạ, thiết bị quan sát và truyền tín hiệu bằng sóng âm cho phương tiện chuyển động ngầm [1]. Trong đó, hướng nghiên cứu, điều chỉnh độ sâu và truyền động của phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV là hướng nghiên cứu đang được các nhà khoa học quan tâm nhất. Các kỹ thuật điều khiển sử dụng mô hình toán học nói chung đều nhằm mục đích nâng cao chất lượng điều khiển như mong muốn.

Trong đó lý thuyết điều khiển cổ điển tập trung vào các vấn đề của điều khiển phản hồi từ thế kỷ 19 và nhất là trong những năm 1920-1940, như mô hình phương trình vi phân của các hệ thống động, lý thuyết về tính ổn định, các phương pháp phân tích trong miền tần số..., những năm đầu thập kỷ 60 của thế kỷ 20 mới được coi là giai đoạn phát triển thực sự của lý thuyết điều khiển cổ điển với sự ra đời của các công cụ phân tích và thiết kế hệ thống. Đặc điểm cơ bản của lý thuyết điều khiển cổ điển là việc sử dụng các phương pháp trong miền tần số, dựa trên phép biến đổi Laplace. Chính do đặc điểm đó nên lý thuyết điều khiển cổ điển chỉ thích hợp cho các hệ thống tuyến tính [16].

Với sự phát triển mạnh mẽ các lĩnh vực ứng dụng của điều khiển phi tuyến thì vai trò các phương pháp trong miền thời gian ngày càng chiếm ưu thế so với các phương pháp trong miền tần số. Cùng với sự phổ biến ngày càng rộng rãi của các hệ thống điều khiển sử dụng máy tính, điều khiển số đã trở thành lĩnh vực quan trọng hàng đầu của kỹ thuật điều khiển, vì thế ngày nay không thể xây dựng một hệ thống điều khiển nếu thiếu đi máy tính hay các bộ vi điều khiển. Ngoài ra, kỹ thuật điều khiển hiện đại còn quan tâm tới một số vấn đề khác như điều khiển thích nghi và tối ưu vì hai lý do chính một là các hệ thống cần điều khiển ngày càng trở nên phức tạp,

không thể mô hình hóa được một cách chính xác, hai là tính hiệu quả đối với nhiều hệ thống điều khiển hiện đại được xem là chỉ tiêu chất lượng quan trọng nhất [44].

Các công trình nghiên cứu về điều khiển phương tiện chuyển động ngầm dạng AUV cũng phát triển cùng với sự phát triển của lý thuyết điều khiển và được phân tích dưới nhiều dạng khác nhau nhưng xét chung lại có ba loại thuật toán điều khiển chính được nghiên cứu sinh tổng hợp như sau: Điều khiển mô hình tuyến tính (PID, LQR), điều khiển mô hình phi tuyến (Điều khiển trượt SMC, điều khiển Backsepping, điều khiển trượt tầng HSMC, điều khiển thích nghi) và điều khiển thông minh (điều khiển mạng nơron, điều khiển mờ...)

Để nghiên cứu các thuật toán điều khiển cho AUV thì điều khiển thông minh có những ưu điểm rất lớn, một là tận dụng được kiến thức chuyên gia trong điều khiển, hai là tính linh hoạt cao, có khả năng thay đổi để đáp ứng dần tốt hơn (khả năng tự học), ba là có thể không cần biết mô hình toán học của hệ thống .... Tuy nhiên những nhược điểm mà điều khiển thông minh mang lại cũng không phải là ít như khó được bảo đảm bằng toán học, cấu trúc điều khiển phức tạp. Vì thế bộ điều khiển thông minh thường đi kèm với các bộ điều khiển phi tuyến để tạo thành các hệ Hybrid (hệ lai) để tận dụng những lợi thế của điều khiển phi tuyến và phát huy ưu điểm của điều khiển thông minh [22], [23]. Trong phần tiếp theo nghiên cứu sinh trình bày về mô hình toán của AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành, đây chính là tiền đề cho việc nghiên cứu các bộ điều khiển và những đóng góp của luận án trong suốt quá trình nghiên cứu.

## **2.1. Mô hình toán của AUV**

### **2.1.1. Mô hình toán AUV 6 DOF (Dynamics)**

Thiết bị lặn tự hành AUV coi như là một vật rắn. Do đó phương trình chuyển động của AUV được biểu diễn bằng tập các véc-tơ:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (2.1)$$

Trong đó:

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$  là véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ  $O - xyz$

$\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$  là véc-tơ lực và mô men điều khiển trong hệ tọa độ động  $O - xyz$

$M_{RB}$  là ma trận quán tính hệ thống của AUV

$C_{RB}(v)$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm của AUV

Ma trận quán tính hệ thống của AUV

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & l_x & l_{xy} & l_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & l_{yx} & l_y & l_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & l_{zx} & l_{zy} & l_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Ma trận Coriolis và lực hướng tâm của AUV:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -mr & mq & m(y_g q + z_g r) & -mx_g q & -mx_g r \\ mr & 0 & -mp & -my_g p & m(z_g r + x_g p) & -my_g r \\ -mq & mp & 0 & -mz_g p & -mz_g q & m(x_g p + y_g q) \\ -m(y_g q + z_g r) & my_g p & mz_g p & 0 & l_{zx} p + l_{zy} q + l_z r & -l_{yx} p - l_y q - l_{yz} r \\ mx_g u & -m(z_g r + x_g p) & mz_g q & -l_{zx} p - l_{zy} q - l_z r & 0 & l_x p + l_{xy} q + l_{xz} r \\ mx_g r & my_g r & -m(x_g p + y_g q) & l_{yx} p + l_y q + l_{yz} r & -l_x p - l_{xy} q - l_{xz} r & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Véc-tơ tổng quát của lực và mô men ngoài  $\tau_{RB}$  trong phương trình (2.1) là lực bên ngoài (hoặc tại một thời điểm) tác động lên AUV bao gồm:

- (1) Véc-tơ lực tĩnh  $\tau_g$  (trọng lực và độ nổi)
- (2) Véc-tơ thủy động lực học của AUV (bao gồm lực  $\tau_A$  gây ra bởi khối lượng thêm vào và lực giảm chấn  $\tau_v$ )
- (3) Véc-tơ lực điều khiển (bao gồm lực đẩy  $\tau_{prop}$  và lực của cánh lái  $\tau_R$ )

Trong đó véc-tơ lực tĩnh  $\tau_g$  phản ánh ảnh hưởng của trọng lượng và sức nổi của AUV. Cụ thể, trọng lượng của AUV là  $W = mg$  và độ nổi là  $B = \rho \nabla g$ ; với  $\rho$  là trọng lượng riêng chất lỏng xung quanh,  $\nabla$  là tổng thể tích được dịch chuyển bởi AUV,  $g$  là gia tốc trọng trường,  $m$  là khối lượng của AUV.

Do đó,  $\tau_g$  được cho bởi phương trình sau:

$$\tau_g = \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \\ K_g \\ M_g \\ N_g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -(W - B) \sin(\theta) \\ (W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (y_g W - y_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) - (z_g W - z_B B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(z_g W - z_B B) \sin(\theta) - (x_g W - x_B B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ (x_g W - x_B B) \cos(\theta) \sin(\phi) - (y_g W - y_B B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Khi thiết bị lặn tự hành AUV chuyển động sẽ ép toàn bộ chất lỏng với các biên độ hạt chất lỏng khác nhau, đồng bộ với chuyển động điều hòa cưỡng bức của AUV. Khối lượng tăng thêm được hiểu như lực và mô men cảm ứng áp suất sinh ra từ chuyển động điều hòa cưỡng bức của AUV và tỉ lệ với gia tốc của AUV. Trong đó  $M_A$  là ma trận quán tính hệ thống của khối lượng tăng thêm,  $C_A(v)$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm thủy động lực học.

Ma trận  $M_A$  được biểu diễn như sau:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & X_{\dot{w}} & 0 & X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Vì  $M_A$  là độc lập với tần số sóng (với tần số thấp) nên có thể giả thiết  $M_A > 0$  là hằng số dương có thể ứng dụng trong điều khiển.

Ma trận Coriolis và lực hướng tâm thủy động lực học  $C_A(v)$ :

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & -a_2 \\ 0 & 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & a_2 & -a_1 & 0 \\ 0 & a_3 & -a_2 & 0 & b_3 & -b_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 & -b_3 & 0 & b_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 & b_2 & -b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Trong đó:

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{q}}q$$

$$a_2 = Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q$$

$$b_1 = K_{\dot{v}}v + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{q}}q$$

$$b_3 = N_{\dot{v}}v + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{r}}r$$

Do đó  $\tau_A$  tính bởi phương trình sau:

$$\tau_A = -(M_A \dot{v} + C_A(v)v) \quad (2.7)$$

Ngoài sự suy giảm thế năng cảm ứng bức xạ, cần phải xét cả những tác động suy giảm khác như ma sát bề mặt, sự suy giảm độ trôi của sóng và sự suy giảm do dòng xoáy đó là:

$$\tau_v = D(v)v \quad (2.8)$$

Ma trận giảm chấn  $D(v)$  được cho bởi:

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_0|u| & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| & 0 & 0 \\ M_0|u| & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Trong đó:

$X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q$  và  $N_r$  là các hệ số giảm chấn tuyến tính.

$X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|$  và  $N_{r|r}|r|$  là các hệ số giảm chấn bậc hai.

$Z_0|u|$  và  $M_0|u|$  là hiệu ứng gây ra bởi sự bất đối xứng trên mặt phẳng  $O-xy$ .

Ta có véc-tơ  $\tau$  biểu diễn lực và mô men đẩy như sau

$$\tau = \tau_{RB} + \tau_g + \tau_v - \tau_A \quad (2.10)$$

Khi nghiên cứu xây dựng mô hình AUV trong phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn mô hình lý tưởng nên bỏ qua Véc-tơ lực tĩnh  $\tau_g$ . Do đó:

$$\tau = \tau_{RB} + \tau_v - \tau_A \quad (2.11)$$

Thay (2.1), (2.7) và (2.8) vào phương trình (2.11) được phương trình:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \quad (2.12)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} M &= M_{RB} + M_A \\ C(v) &= C_{RB}(v) + C_A(v) \\ D(v) &= D(v) \end{aligned}$$

### 2.1.2. Mô hình toán AUV 4 DOF hệ thiếu cơ cấu chấp hành

Tùy theo các ứng dụng cụ thể mà ta chọn số bậc tự do phù hợp, số bậc tự do càng ít thì khả năng điều khiển sẽ đỡ phức tạp hơn. 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. Để đơn giản hóa đối với các loại thiết bị lặn tự hành cỡ nhỏ có thể bỏ 2 bậc tự do không cần thiết là: Góc  $\theta$  (chuyển động quay lật) và góc  $\phi$  (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 (một động cơ chân chân vịt chính để di chuyển, một động cơ chân vịt mũi, một động cơ bánh lái để điều hướng và hai động cơ bơm để lặn nổi). Mục đích để đơn giản hóa trong quá trình điều khiển mà vẫn đảm bảo được yêu cầu nhiệm vụ đặt ra. Vị trí tọa độ  $(x, y)$ , hướng đi của AUV  $(\psi)$  và vị trí trục  $z$  (độ sâu lặn).

Phương tiện chuyển động ngầm AUV 4 DOF có phương trình động học phi tuyến tổng quát như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \end{cases} \quad (2.13)$$

Trong đó  $J(\eta)$  là ma trận quay quanh trục  $Oz$  biểu diễn như sau:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Ma trận quán tính của hệ thống:

$$M = \begin{bmatrix} m + X_{\dot{u}} & 0 & X_{\dot{w}} & -my_g \\ 0 & m + Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{r}} + mx_g \\ Z_{\dot{u}} & 0 & m + Z_{\dot{w}} & 0 \\ -my_g & mx_g + N_{\dot{v}} & 0 & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Ma trận Coriolis và ma trận lực hướng tâm của hệ thống:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -mr & 0 & -mx_g r - a_2 \\ mr & 0 & 0 & -my_g r + a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ mx_g r + a_2 & my_g r - a_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$D(v)$  là ma trận suy giảm thủy động lực học được biểu diễn như sau:

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 & 0 \\ Z_0|u| & 0 & Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p}|p| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

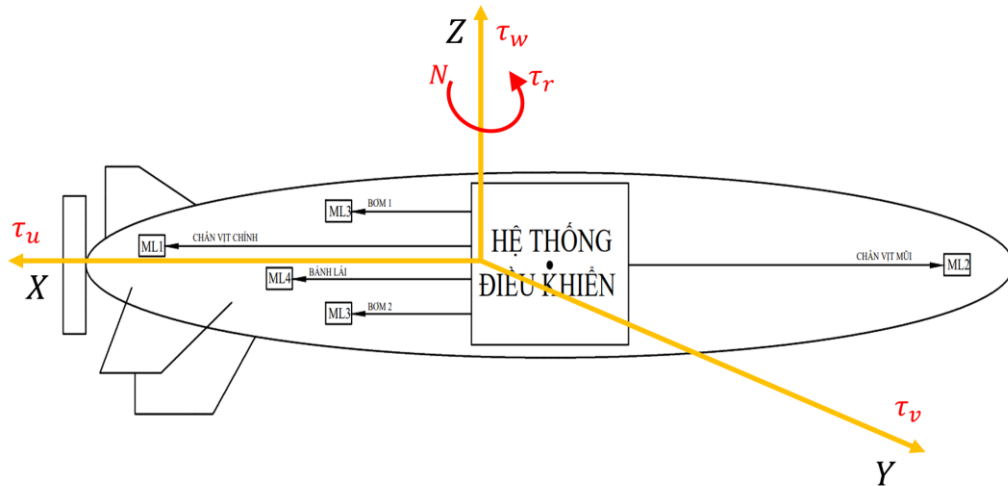
Trong đó các ma trận  $M, J(\eta), C(v), D(v)$  thỏa mãn những tính chất sau:

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

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

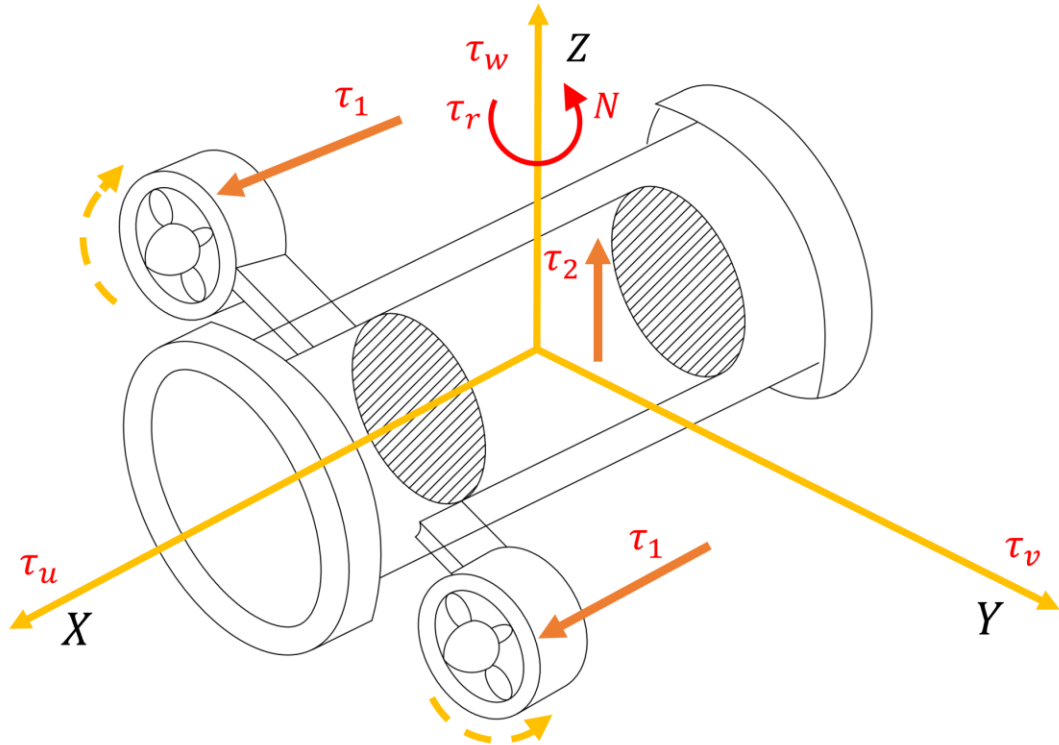
Mô hình chuyển động bốn bậc tự do của tàu ngầm AUV bao gồm :  $\eta = [x, y, z, \psi]^T$  là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục  $Ox, Oy, Oz$  và góc điều hướng tàu quay quanh trục  $Oz$ ;  $v = [u, v, w, r]^T$  là véc-tơ vận tốc dài theo các phương  $Ox, Oy, Oz$  và tốc độ quay xung quanh trục  $Oz$ . Theo hệ phương trình (2.13)  $\tau$  – là lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện của AUV, các lực và mô men này được thực hiện bởi  $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_w, \tau_r]^T$ . Trong đó:  $\tau_u$  – lực làm cho AUV trượt dọc theo hướng trục X,  $\tau_v$  – lực làm cho AUV trượt ngang theo hướng trục Y,  $\tau_w$  – lực làm cho tàu trượt ngang theo hướng trục Z,  $\tau_r$  – mô-men quay xung quanh trục z gây ra thay đổi hướng đi của AUV.

Theo Fossen [16], [44] mô hình AUV 4 bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang với mô hình toán như hệ phương trình (2.13), nếu thành phần lực tác động  $\tau$  có đầy đủ bốn thành phần  $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_w, \tau_r]^T$  và  $v = [u, v, w, r]^T$  thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành (Full Actuated) như hình 2.1



Hình 2.1. Phân tích lực AUV 4 DOF trong không gian 3 chiều

Mô hình toán của AUV 4 DOF có nhiều cơ cấu thực hiện như: Chân vịt chính sau lái (ML1) tạo ra lực đẩy trượt dọc  $\tau_u$ , chân vịt phụ tạo ra lực trượt ngang  $\tau_v$  (ML2), hai bơm nước ở hai bên AUV sẽ tạo ra lực trượt dọc  $\tau_w$  (ML3), bánh lái chính sau lái (ML4) tạo ra mô-men  $\tau_r$  thay đổi hướng đi của tàu. Mô hình toán này thường gặp để phân tích và sử dụng để thiết kế điều khiển trong các tàu ngầm khảo sát đáy biển, tàu ngầm công trình [13], [14], AUV có cánh năng lượng mặt trời [17]. Mặt khác, nếu  $\tau_v, \tau_r = 0$  tức là trong mô hình toán của AUV không có thành phần lực gây ra trượt ngang và quay trở (phần tử thực hiện không có cơ cấu đẩy ngang và bánh lái) hướng theo trục y thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated). Giả thiết rằng lực tác động của bánh lái phía sau lái có thành phần lực gây ra trượt ngang là rất nhỏ, điều đó không mất đi tính thực tế là AUV không có dạt ngang trong quá trình chuyển động. Đây là mô hình toán đặc trưng cho loại AUV chỉ có 2 cơ cấu thực hiện là động cơ đẩy phía sau và động cơ theo trục dọc như mô hình hoạt động của Quadrotor UAV hay gọi là QUV (hình 2.2).



Hình 2.2. Phân tích lực AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành

Lực song song (hay còn gọi là lực trượt) là thành phần của lực tác động song song với mặt phẳng AUV. Lực và mô men  $\tau_1$  này có tác dụng điều khiển AUV theo phương X, khi  $\tau_1$  khác  $\tau_1'$  AUV sẽ sang trái hay sang phải theo phương OY và quay quanh trục Z như (hình 2.2). Lực và mô men này làm cho AUV chuyển động trượt dọc theo trục x, trượt ngang theo trục y và quay trở quanh trục z ( $\psi$ ) có giá trị nằm trong khoảng  $(-90^0 : 90^0)$

Lực vuông góc (hay còn gọi là lực phản xạ) là thành phần của lực tác động vuông góc vào mặt phẳng AUV. Khi chiếu xuống mặt phẳng nằm ngang lực vuông góc  $\tau_2$  điều khiển AUV theo phương OZ làm cho AUV nổi lên hay lặn xuống. Lực này làm cho AUV chuyển động trượt đứng theo trục z (hình 2.2)

AUV được coi là thiết bị thiếu cơ cấu chấp hành (Underactuated) khi số tín hiệu điều khiển đầu vào ít hơn số biến trạng thái điều khiển (hay số bậc tự do) [21]. NCS tách mô hình toán (hệ phương trình 2.13) thành hai phần là hệ thống thiếu chấp hành và hệ thống đủ chấp hành. Véc-tơ vị trí  $\eta = [\eta_1 \ \eta_2]^T$  sẽ được chia làm hai phần  $\eta_1 = [x \ z]^T$  cho trạng thái đủ chấp hành và  $\eta_2 = [y \ \psi]^T$  cho trạng thái thiếu chấp hành. Tương tự, véc-tơ vận tốc  $v$  cũng được chia làm hai phần với  $v = [v_1 \ v_2]^T$ . Phương trình động lực học AUV (2.13) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 + J_{12}v_2 \\ \dot{\eta}_2 = J_{21}v_1 + J_{22}v_2 \\ M_{11}\dot{v}_1 + (C_{11} + D_{11})v_1 + M_{12}\dot{v}_2 + (C_{12} + D_{12})v_2 = \tau \\ M_{21}\dot{v}_1 + (C_{21} + D_{21})v_1 + M_{22}\dot{v}_2 + (C_{22} + D_{22})v_2 = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

Với:

$$\begin{aligned} M_{11} &= \begin{bmatrix} m + X_{\dot{u}} & 0 \\ 0 & m + Y_{\dot{v}} \end{bmatrix}; M_{12} = \begin{bmatrix} X_{\dot{w}} & -my_g \\ 0 & Y_r + mx_g \end{bmatrix}; \\ M_{21} &= \begin{bmatrix} Z_{\dot{u}} & 0 \\ -my_g & mx_g + N_{\dot{v}} \end{bmatrix}; M_{22} = \begin{bmatrix} m + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & I_z + N_r \end{bmatrix}; \\ C_{11}(v) &= \begin{bmatrix} 0 & -mr \\ mr & 0 \end{bmatrix}; C_{12}(v) = \begin{bmatrix} 0 & -mx_g r - a_2 \\ 0 & -my_g r + a_1 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{21}(v) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ mx_g r + a_2 & my_g r - a_1 \end{bmatrix}; \quad C_{22}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
J_{11}(v) &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix}; \quad J_{12}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
J_{21}(v) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad J_{22}(v) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
D_{11}(v) &= \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| \end{bmatrix}; \quad D_{12}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
D_{21}(v) &= \begin{bmatrix} Z_0|u| & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D_{22}(v) = \begin{bmatrix} Z_w + Z_{w|w}|w| & 0 \\ 0 & K_p + K_{p|p}|p| \end{bmatrix};
\end{aligned}$$

Vì  $M_{22}$  là ma trận xác định dương nên từ phương trình thứ tư trong (2.18), suy ra:

$$\dot{v}_2 = -M_{22}^{-1} [M_{21}\dot{v}_1 + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2] \quad (2.19)$$

Thay (2.19) vào phương trình thứ ba trong (2.18):

$$M_{11}\dot{v}_1 + (C_{11} + D_{11})v_1 - M_{12}M_{22}^{-1} [M_{21}\dot{v}_1 + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2] + (C_{12} + D_{12})v_2 = \tau \quad (2.20)$$

$$\Leftrightarrow (M_{11} - M_{12}M_{22}^{-1}M_{21})\dot{v}_1 + ((C_{11} + D_{11}) - M_{12}M_{22}^{-1}(C_{21} + D_{21}))v_1 + ((C_{12} + D_{12}) - M_{12}M_{22}^{-1}(C_{22} + D_{22}))v_2 = \tau$$

Rút gọn phương trình (2.20) tính được:

$$\bar{M}\dot{v}_1 + \bar{C}_1v_1 + \bar{C}_2v_2 = \tau \quad (2.21)$$

Với:

$$\begin{aligned}
\bar{M} &= M_{11} - M_{12}M_{22}^{-1}M_{21} \\
\bar{C}_1 &= (C_{11} + D_{11}) - M_{12}M_{22}^{-1}(C_{21} + D_{21}) \\
\bar{C}_2 &= (C_{12} + D_{12}) - M_{12}M_{22}^{-1}(C_{22} + D_{22})
\end{aligned}$$

Vì ma trận  $\bar{M}$  là ma trận khả nghịch xác định dương nên từ phương trình (2.21), suy ra:

$$\dot{v}_1 = \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + \bar{M}^{-1}\tau \quad (2.22)$$

Thay (2.22) vào phương trình (2.19):

$$\dot{v}_2 = -M_{22}^{-1} [M_{21}\bar{M}^{-1}(\tau - \bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2]$$

$$\Leftrightarrow \dot{v}_2 = -M_{22}^{-1} [M_{21}\bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2] - M_{22}^{-1}M_{21}\bar{M}^{-1}\tau$$

Thay (2.21) và (2.22) vào hệ phương trình (2.18), suy ra hệ phương trình động lực học của AUV được tính như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + \bar{M}^{-1}\tau \\ \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = -M^{-1}_{22} \left[ M_{21}\bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2 \right] - M^{-1}_{22}M_{21}\bar{M}^{-1}\tau \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\text{Với: } J_{12}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ và } J_{21}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 2.2. Cơ sở lý thuyết điều khiển Backstepping thích nghi mờ

### 2.2.1. Kỹ thuật điều khiển Backstepping

Bộ điều khiển Backstepping được thiết kế theo phương pháp đệ quy để xây dựng cả luật điều khiển phản hồi và hàm điều khiển Lyapunov một cách có hệ thống. Kỹ thuật điều khiển Backstepping phát triển khi chia hệ thống phi tuyến truyền ngược chặt  $n$  bậc thành hệ con, sau đó thiết kế luật điều khiển phản hồi và hàm điều khiển Lyapunov từng hệ con đó [55].

Xét một hệ phi tuyến bất kỳ truyền ngược chặt bao gồm một đầu vào một đầu ra  $n$  bậc như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_i = f_i(x_i) + g_i(x_i)x_{i+1} \\ \dot{x}_n = f_n(x_n) + g_n(x_n)\tau \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.24)$$

Trong đó  $x_n = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$  là véc-tơ trạng thái hệ thống,  $\tau \in R$  là đầu vào điều khiển của hệ thống,  $y \in R$  là đầu ra của hệ thống,  $f_i(\cdot)$  và  $g_i(\cdot)$  Là các hàm thông số phi tuyến của hệ thống với  $i = 1, 2, \dots, n$ . Với điều kiện hàm  $g_i(\cdot) \neq 0$ .

Đôi tượng của bài toán cần tìm luật điều khiển  $\tau$  để hệ thống ổn định, đầu ra hệ thống có thể bám tín hiệu đặt mong muốn  $y = x_1 = x_d$ .

Phương pháp điều khiển Backstepping được thực hiện theo các bước sau:

*Bước đầu tiên:* Xét hệ con thứ nhất

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad (2.25)$$

Đặt biến trạng thái mới như sau:

$$z_1 = x_1 - x_d \quad (2.26)$$

Đạo hàm  $z_1$  theo thời gian suy ra:

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{x}_d \quad (2.27)$$

Lựa chọn hàm Lyapunov cho hệ con thứ nhất:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (2.28)$$

Đạo hàm  $V_1$  theo thời gian như sau:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 \left[ f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{x}_d \right] \quad (2.29)$$

Lựa chọn giá trị biến trạng thái là:

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (2.30)$$

Trong đó  $\alpha_1$  là tín hiệu điều khiển ảo cho hệ con thứ nhất,  $x_2 = z_2 + \alpha_1$

$$\dot{V}_1 = z_1 \left[ f_1(x_1) + g_1(x_1)(z_2 + \alpha_1) - \dot{x}_d \right]$$

Tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ nhất được tính như sau:

$$\alpha_1 = \frac{-c_1 z_1 - \left( f_1(x_1) - \dot{x}_d \right)}{g_1(x_1)} \quad (2.31)$$

Trong đó:

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + g_1(x_1) z_1 z_2 \quad (2.32)$$

Với toán hạng  $-c_1 z_1^2$  làm hệ ổn định và toán hạng  $g_1(x_1) z_1 z_2$  sẽ được loại bỏ ở bước tiếp theo.

*Bước thứ 2:* Đạo hàm  $z_2$  theo t

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad (2.33)$$

Lựa chọn hàm Lyapunov cho hệ con thứ 2:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (2.34)$$

Đạo hàm của  $V_2$  theo thời gian:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \quad (2.35)$$

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + g_1(x_1) z_1 z_2 + z_2 \left[ f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2) x_3 - \dot{\alpha}_1 \right] \quad (2.36)$$

Đặt biến trạng thái như sau:

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (2.37)$$

Trong đó  $\alpha_2$  là tín hiệu điều khiển ảo cho hệ con thứ hai,  $x_3 = z_3 + \alpha_2$

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + g_1(x_1) z_1 z_2 + z_2 \left[ f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2) (z_3 + \alpha_2) - \dot{\alpha}_1 \right] \quad (2.38)$$

Chọn tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ hai

$$\alpha_2 = \frac{-c_2 z_2 - g_1(x_1) z_2 - \left( f_2(x_1, x_2) - \dot{\alpha}_1 \right)}{g_2(x_1, x_2)} \quad (2.39)$$

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + g_2(x_1, x_2) z_2 z_3 \quad (2.40)$$

Trong đó các toán hạng  $-c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2$  làm hệ ổn định, còn toán hạng  $g_2(x_1, x_2) z_2 z_3$  sẽ được loại bỏ ở bước tiếp theo.

*Bước i:* Xét biến trạng thái thứ i

$$z_i = x_i - \alpha_{i-1} \quad (2.41)$$

Đạo hàm theo thời gian ta có:

$$\dot{z}_i = \dot{x}_i - \dot{\alpha}_{i-1} = f_i(x_i) + g_i(x_i) x_{i+1} - \dot{\alpha}_{i-1} \quad (2.42)$$

Trong đó  $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T, i=1, 2, \dots, n-1, \alpha_{i-1}$  là tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ  $i-1$

Chọn hàm Lyapunov của hệ con thứ i :

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} z_i^2 \quad (2.43)$$

Đạo hàm của  $V_2$  theo thời gian:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{i-1} + z_i \dot{z}_i \quad (2.44)$$

$$\dot{V}_i = -\sum_{k=1} c_k z_k^2 + g_{i-1}(x_{i-1})z_{i-1}z_i + z_i \left[ f_i(x_i) + g_i(x_i)x_{i+1} - \dot{\alpha}_{i-1} \right] \quad (2.45)$$

Lựa chọn biến trạng thái thứ  $i + 1$

$$z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i \quad (2.46)$$

Trong đó  $\alpha_i$  là tín hiệu điều khiển ảo cho hệ con thứ  $i$ ,  $x_{i+1} = z_{i+1} + \alpha_i$

$$\dot{V}_i = -\sum_{k=1}^{i-1} c_k z_k^2 + g_{i-1}(x_{i-1})z_{i-1}z_i + z_i \left[ f_i(x_i) + g_i(x_i)(z_{i+1} + \alpha_i) - \dot{\alpha}_{i-1} \right] \quad (2.47)$$

Chọn tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ  $i$ :

$$\alpha_i = \frac{-c_i z_i - g_{i-1}(x_{i-1})z_{i-1} - (f_i(x_i)) - \dot{\alpha}_{i-1}}{g_i(x_i)} \quad (2.48)$$

$$\dot{V}_i = -\sum_{k=1}^i c_k z_k^2 + g_i(x_i)z_i z_{i+1} \quad (2.49)$$

Trong đó các toán hạng  $-\sum_{k=1}^i c_k z_k^2$  làm hệ ổn định, toán hạng  $g_i(x_i)z_i z_{i+1}$

được loại bỏ ở bước tiếp theo.

*Bước n:* Xét

$$z_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (2.50)$$

Đạo hàm theo thời gian biến trạng thái thứ  $n$ :

$$\dot{z}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} = f_n(x_n) + g_n(x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (2.51)$$

Trong đó  $x_n = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ ,  $\alpha_{i-1}$  là tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ  $n - 1$

Chọn hàm Lyapunov của hệ con thứ  $n$ :

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2 \quad (2.52)$$

Đạo hàm của  $V_n$  theo thời gian:

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + z_n \dot{z}_n \quad (2.53)$$

$$\dot{V}_n = -\sum_{k=1}^{n-1} c_k z_k^2 + g_{n-1}(x_{i-1})z_{n-1}z_n + z_n \left[ f_n(x_n) + g_n(x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} \right] \quad (2.54)$$

Chọn tín hiệu điều khiển ảo của hệ con thứ n:

$$\tau = \frac{-c_n z_n - g_n(x_n) z_{n-1} - \left( f_n(x_n) - \dot{\alpha}_{n-1} \right)}{g_n(x_n)} \quad (2.55)$$

$$\dot{V}_n = -\sum_{k=1}^n c_k z_k^2 \leq 0 \quad (2.56)$$

Biểu thức (2.55) cho thấy với cách thiết kế bộ điều khiển theo kỹ thuật backstepping ta sẽ tìm được bộ điều  $\tau$  làm cho hệ phi tuyến truyền ngược chặt (2.24) ổn định,  $z = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$  tiến tới lân cận của không.

$$|z| < \varepsilon \text{ với } \varepsilon > 0 \text{ bất kỳ} \quad (2.57)$$

Như vậy có thể thấy  $z_1 = x_1 - x_d$  tiến tới lân cận không hay  $x_1$  tiến tới lân cận  $x_d$ , đáp ứng được yêu cầu bám tín hiệu đặt.

Biểu thức (2.24) cho thấy tín hiệu điều khiển  $\tau$  chỉ được xác định khi các hàm  $f_i(\cdot)$  và  $g_i(\cdot)$  với  $i = 1, 2, \dots, n$  là các hàm thông số phi tuyến đã biết của hệ thống. Khi các hàm này là bất định hay không biết trước thì không xác định được tín hiệu điều khiển  $\tau$ .

Thuật toán điều khiển cuốn chiếu Backstepping dựa trên cách thiết kế từng bước cho bộ điều khiển phản hồi thỏa mãn ổn định Lyapunov. Phương pháp này sử dụng phép phân tích đệ quy để xây dựng thuật toán điều khiển phản hồi đáp ứng được tính phi tuyến của đối tượng. Vì thế sẽ có nhiều cách thiết kế bộ điều khiển Backstepping khác nhau, có thể kể đến là điều khiển cuốn chiếu bền vững cho hệ thống có những thành phần nhiễu phi tuyến, bộ điều khiển cuốn chiếu thích nghi với những hệ có nhiễu loạn, hay bộ điều khiển cuốn chiếu tích phân cho đối tượng phi tuyến tắt dần. Số bước lặp lại (backstep) khi tổng hợp bộ điều khiển chính bằng số bậc của hệ [33].

### 2.2.2. Điều khiển dựa trên hệ suy diễn mờ

Mô hình mờ Sugeno được giới thiệu trong nghiên cứu [56] năm 1985 được xem như là sự cải tiến của mô hình hệ thống mờ Mamdani. Mô hình mờ Sugeno có các biến đầu vào của hệ suy diễn là các biến ngôn ngữ, đầu ra là các

hằng số thực của biến ra. Mô hình Sugeno MISO được xây dựng theo các bước sau đây:

1. Chọn các tập mờ cho biến ngôn ngữ đầu vào.
2. Chọn các hằng số cho biến đầu ra.
3. Xây dựng hệ luật suy diễn cơ bản được biểu diễn như sau:  
 $R_1$ : Nếu  $X_1$  là  $A_{11}$  và  $X_2$  là  $A_{22}$  và .... và  $X_m$  là  $A_{m1}$  thì  $y = C_1$  hoặc  
 $R_2$ : Nếu  $X_1$  là  $A_{1j_1}$  và  $X_2$  là  $A_{2j_2}$  và .... và  $X_m$  là  $A_{mj_m}$  thì  $y = C_2$  hoặc  
 ...  
 $R_n$ : Nếu  $X_1$  là  $A_{1n}$  và  $X_2$  là  $A_{2n}$  và ... và  $X_m$  là  $A_{m,n}$  thì  $y = C_n$

Trên đây là hệ suy diễn cho mô hình mờ Sugeno với  $m$  biến ngôn ngữ đầu vào và một biến đầu ra với  $n$  luật suy diễn cơ sở.

4. Xác định giá trị đầu ra của mô hình mờ Sugeno

Ứng với véc-tơ giá trị rõ  $\underline{x}_0$  [57] ta có:

$$y(\underline{x}_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i C_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.58)$$

Với  $w_i$  là độ thỏa mãn cực đại của  $R_i$  đối với véc-tơ giá trị rõ đầu vào

$$\underline{x} = \underline{x}_0$$

$$w_i = \prod_{k=1}^m \mu_{A_{kj_k}}(x_k); i = 1, 2, \dots, n \quad (2.59)$$

### ***Phương pháp suy luận tuyến tính trong biểu diễn hệ mờ***

Hệ suy diễn cho mô hình Sugeno được sử dụng là hệ suy diễn tuyến tính [56], hệ này được sử dụng cho các mô hình mờ hai đầu vào và một ra. Nguyên tắc cơ bản của hệ suy diễn này được thực hiện như sau:

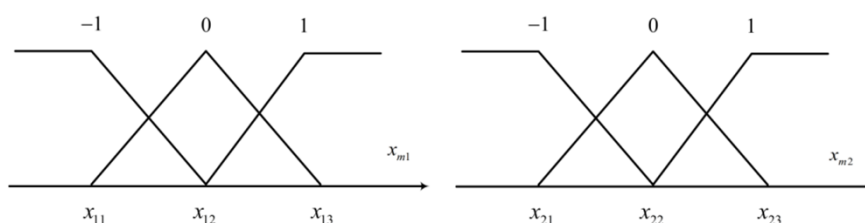
- Số các tập mờ cho các biến ngôn ngữ đầu vào và số các hằng số ra được chọn là lẻ: 3, 5, 7, 9.
- Tên các tập mờ đầu vào và các hằng số đầu ra cũng gán bằng số đối xứng qua không.

- Luật suy diễn cơ sở được chọn theo nguyên tắc  $i + j + k = 0$ , trong đó  $i, j$  là tên các tập mờ của biến ngôn ngữ đầu vào và  $k$  là tên tập mờ của biến ngôn ngữ đầu ra.

Thực chất phương pháp suy luận tuyến tính không làm thay đổi bản chất suy luận mờ. Nó chỉ giúp cho việc biểu diễn hệ mờ được tường minh hơn.

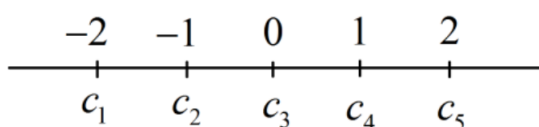
Làm rõ hơn phương pháp thiết kế này qua ví dụ sau:

Xét hệ mờ có hai biến ngôn ngữ là  $X_1$  và  $X_2$  định nghĩa trên tập nền  $x_{m1}$  và  $x_{m2}$ , tập mờ của mỗi biến ngôn ngữ được gọi là -1, 0, 1 như trong hình 2.1.



Hình 2.3. Tập mờ của hai biến ngôn ngữ đầu vào  $X_1$  và  $X_2$

Tương tự như vậy tên các hằng số đầu ra cũng được gọi tên bằng số: -2, -1, 0, 1, 2 thể hiện trong hình 2.3.



Hình 2.4. Tên các hằng số đầu ra

Nếu gọi tên tập mờ của biến ngôn ngữ  $X_1$  là  $i$ , tên tập mờ của biến ngôn ngữ  $X_2$  là  $j$  và tên các hằng số đầu ra là  $k$  thì với cách biểu diễn tuyến tính của luật suy diễn mờ:

$$i + j + k = 0 \quad (2.60)$$

Hệ luật suy diễn theo phương pháp tuyến tính được thể hiện cụ thể trong bảng dưới đây:

**Bảng 2.1: Hệ luật suy diễn theo phương pháp tuyến tính**

| $j \backslash i$ | -1 | 0  | 1  |
|------------------|----|----|----|
| 1                | 0  | -1 | -2 |
| 0                | 1  | 0  | -1 |
| -1               | 2  | 1  | 0  |

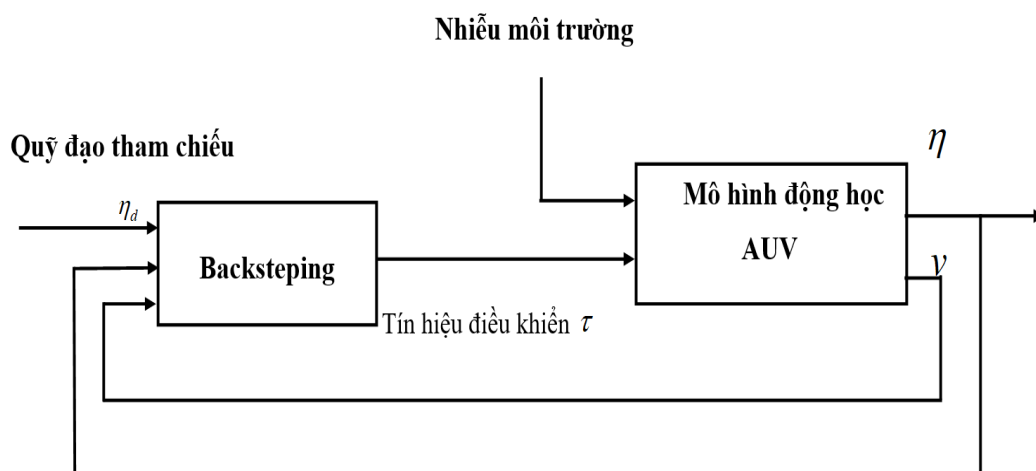
Một lớp các phương pháp khác cũng được sử dụng nhiều để thiết kế điều khiển cho phương tiện chuyển động ngầm dựa trên hệ suy diễn mờ. Các bộ điều khiển sử dụng hệ logic mờ có ưu điểm là trong quá trình thiết kế tận dụng được kinh nghiệm vận hành của chuyên gia không phụ thuộc nhiều vào sự hiểu biết chính xác về mô hình đối tượng. Chính vì thế, bộ điều khiển mờ thường được quan tâm tới đầu tiên khi thiết kế điều khiển cho một đối tượng mới.

### 2.3. Điều khiển Backstepping cho AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành

#### 2.3.1. Tổng hợp bộ điều khiển cho AUV bằng kỹ thuật Backstepping

Có 2 xu hướng để điều khiển hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành, một là thiết kế trực tiếp cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành (HSMC được trình bày trong phần chương 3). Hai là đưa về dạng đủ cơ cấu chấp hành bằng cách tách mô hình đối tượng AUV thành 2 thành phần đủ cơ cấu chấp hành và thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển được thiết kế cho các trạng thái đủ cơ cấu chấp hành trước, sau đó áp dụng tín hiệu điều khiển này cho hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành ban đầu. Đây chính là phương pháp thiết kế bộ điều khiển Backstepping cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành.

Để kiểm chứng mô hình toán AUV 4 bậc tự do hệ thiếu cơ cấu chấp hành đã được trình bày và đề xuất trong phần chương 2 và lý thuyết về bộ điều khiển được NCS trình bày trong phần 2.2.1 về nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển Backstepping điều khiển AUV. Mô hình của hệ thống được mô tả như sau:



Hình 2.5. Cấu trúc hệ thống điều khiển Backstepping cho AUV

Tín hiệu đầu vào  $\eta_d = [x, y, z, \psi]^T$  là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục  $Ox, Oy, Oz$  và góc điều hướng tàu quay quanh trục, gửi tín hiệu về bộ điều khiển Backstepping để cho ra tín hiệu điều khiển  $\tau$ . Với bộ điều khiển đủ cơ cấu chấp hành  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4]^T$  và bộ điều khiển thiếu cơ cấu chấp hành  $\tau = [\tau_1, 0, \tau_2, 0]^T$ ,  $v = [u, v, w, r]^T$  là véc-tơ vận tốc dài theo các phương  $Ox, Oy, Oz$  và tốc độ quay xung quanh trục  $Oz$ . Trả về bộ điều khiển Backstepping để so sánh với tín hiệu đặt (hình 2.5). Thuật toán điều khiển Backstepping được trình bày sau đây:

Hệ phương trình (2.23) được viết lại dạng tổng quát hóa như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = f_1(X) + g_1(X)\tau_1 \\ \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = f_2(X) + g_2(X)\tau_2 \end{cases} \quad (2.61)$$

Trong đó các thông số:

$$\begin{aligned} X &= [\eta_1 \quad v_1 \quad \eta_2 \quad v_2]^T \\ f_1(X) &= \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) \\ g_1(X) &= \bar{M}^{-1} \\ f_2(X) &= -M^{-1}_{22} [M_{21}\bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2] \\ g_2(X) &= -M^{-1}_{22}M_{21}\bar{M}^{-1} \end{aligned} \quad (2.62)$$

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

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 - \eta_{1d} \\ \eta_2 - \eta_{2d} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Coi hệ (2.61) là hai hệ con (2.64), (2.65) với tín hiệu điều khiển  $\tau_1, \tau_2$  cho từng hệ, ta có:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = f_1(X) + g_1(X)\tau_1 \end{cases} \quad (2.64)$$

$$\begin{cases} \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = f_2(X) + g_2(X)\tau_2 \end{cases} \quad (2.65)$$

Tín hiệu điều khiển chung hệ (2.61) được chọn theo luật sau:

$$\tau = \alpha\tau_1 + \beta\tau_2 \quad (2.66)$$

Với  $\alpha, \beta$  là các hằng số dương.

Hệ (2.64), (2.65) là các hệ truyền ngược chặt bậc 2, theo kỹ thuật Backstepping, để xác định tín hiệu điều khiển  $\tau_1, \tau_2$  ta phải tiến hành theo hai bước:

Tổng hợp điều khiển  $\tau_1$ . Xét hệ (2.63)

*Bước 1:* Gọi sai lệch bám vị trí đặt là  $e_1$ :

$$e_1 = \eta_1 - \eta_{1d} \quad (2.67)$$

Đạo hàm  $e_1$  theo thời gian:

$$\dot{e}_1 = \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_{1d} = J_{11}v_1 - \dot{\eta}_{1d} \quad (2.68)$$

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

Thay vào (2.68):

$$\dot{e}_1 = \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_{1d} = J_{11}(e_2 + \alpha_1) - \dot{\eta}_{1d} \quad (2.69)$$

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

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^T e_1 \quad (2.70)$$

Đạo hàm  $V_1$  theo thời gian:

$$\dot{V}_1 = e_1^T \dot{e}_1 = e_1^T (J_{11}(e_2 + \alpha_1) - \dot{\eta}_{1d}) = -c_1 e_1^T e_1 + e_1^T J_{11} e_2 \quad (2.71)$$

Để có (2.71) thì tín hiệu điều khiển ảo có dạng như sau:

$$\alpha_1 = J_{11}^{-1}(-c_1 e_1 + \dot{\eta}_{1d}) \quad (2.72)$$

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

*Bước 2:* Ta có

$$e_2 = v_1 - \alpha_1 \quad (2.73)$$

Đạo hàm  $e_2$  theo thời gian suy ra:

$$\dot{e}_2 = \dot{v}_1 - \dot{\alpha}_1 = f_1(X) + g_1(X)\tau_1 - \dot{\alpha}_1 \quad (2.74)$$

Để xác định tín hiệu điều khiển  $\tau_1$  đảm bảo  $e_2 \rightarrow 0$ , ta chọn hàm Lyapunov:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \quad (2.75)$$

Đạo hàm  $V_2$  theo thời gian tìm được:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2^T \dot{e}_2 = -c_1 e_1^T e_1 + e_1^T J_{11} e_2 + e_2^T (f_1(X) + g_1(X)\tau_1 - \dot{\alpha}_1) \quad (2.76)$$

Chọn tín hiệu điều khiển từ phương trình (2.76):

$$\tau_1 = g_1^{-1}(\mathbf{X})(-c_2 e_2 - J_{11}^T e_1 - f_1(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_1) \quad (2.77)$$

Với  $c_2$  là hằng số dương

Thay phương trình (2.77) vào (2.76):

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_1^T e_1 - c_2 e_2^T e_2 \leq 0 \quad (2.78)$$

Tổng hợp điều khiển  $\tau_2$ . Xét hệ (2.65)

Thiết kế theo phương pháp Backstepping tương tự như thiết kế  $\tau_2$  ta được tín hiệu điều khiển cho hệ con thứ hai:

$$\tau_2 = g_2^{-1}(\mathbf{X})(-c_4 e_4 - J_{22}^T e_3 - f_2(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_2) \quad (2.79)$$

Với  $e_3 = \eta_2 - \eta_{2d}$ ,  $e_4 = \dot{\eta}_2 - \dot{\eta}_{2d}$ ,  $\alpha_2 = J_{22}^{-1}(-c_3 e_3 + \dot{\eta}_{2d})$

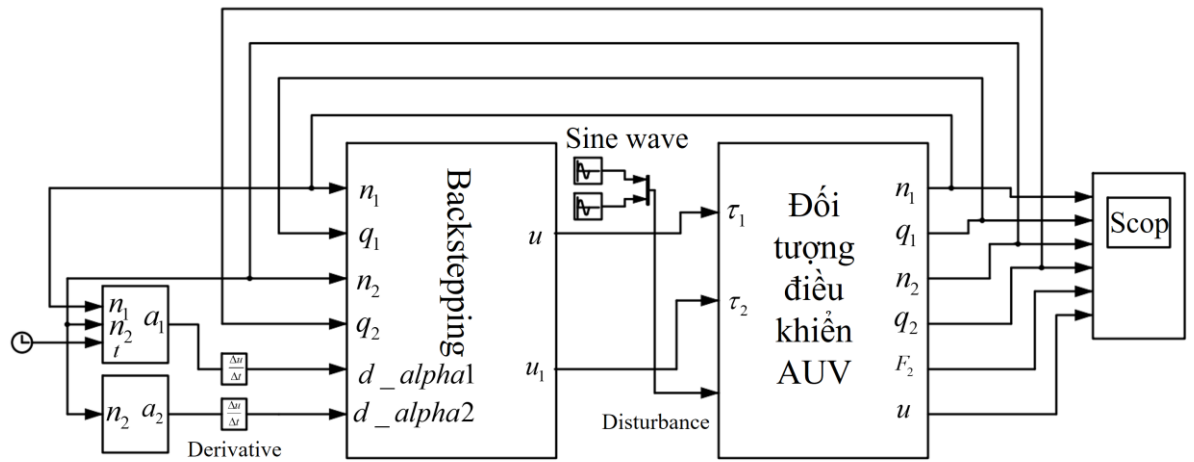
$c_3, c_4$  là các hằng số dương

Với  $\tau_1, \tau_2$  tính theo (2.77), (2.79) thay vào phương trình (2.66) tính được:

$$\tau = \alpha.g_1^{-1}(\mathbf{X})(-c_2 e_2 - J_{11}^T e_1 - f_1(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_1) + \beta.g_2^{-1}(\mathbf{X})(-c_4 e_4 - J_{22}^T e_3 - f_2(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_2) \quad (2.80)$$

### 2.3.2. Phân tích mô hình mô phỏng điều khiển Backstepping cho AUV 4 DOF

Sơ đồ khối mô phỏng hệ thống điều khiển Backstepping cho đối tượng AUV hệ thiếu cơ cấu chấp hành bao gồm khối tín hiệu đầu vào (khối  $a_1, a_2$ ), khối điều khiển Backstepping và mô hình đối tượng điều khiển AUV, khối lấy tín hiệu đầu ra (Scop) như hình 2.6.



Hình 2.6. Sơ đồ mô phỏng điều khiển backstepping cho AUV 4 DOF trên Matlab simulink

Để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển Backstepping áp dụng cho AUV, mô phỏng được thực hiện với bộ tham số sau:

**Bảng 2.2: Tham số mô hình thiết bị AUV [17]**

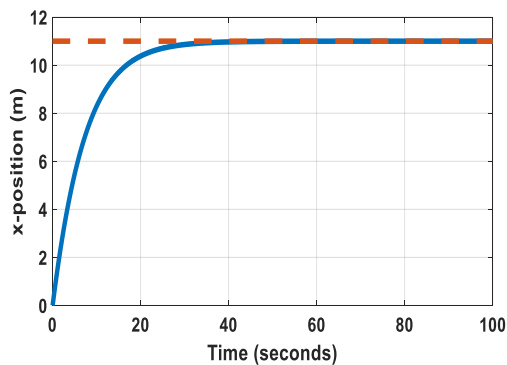
| Tham số     | Giá trị                    | Tham số          | Giá trị                   | Tham số     | Giá trị                         |
|-------------|----------------------------|------------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|
| $m$         | 18.5 kg                    | $Y_r$            | -1.03 kg.m/rad/s          | $N_r$       | -12.32 kg.m <sup>2</sup> /rad/s |
| $x_g$       | 0.15 m                     | $\dot{Y}_v$      | -0.85 kg                  | $\dot{N}_v$ | 0.32 kg.m <sup>2</sup> /rad     |
| $y_g$       | 0.15 m                     | $\dot{Y}_{v v }$ | -0.62 kg/m                | $I_z$       | 1.57 kg.m <sup>2</sup>          |
| $z_g$       | 0 m                        | $Z_w$            | 4.57 kg/s                 | $N_{r r }$  | $0.5 \times 10^{-3}$ kg/m       |
| $\dot{X}_u$ | $6.83 \times 10^{-6}$ kg/s | $\dot{Z}_u$      | 0.32 kg                   | $N_{r r }$  | $0.5 \times 10^{-6}$            |
| $X_{u u }$  | -0.58 kg/m                 | $Z_0$            | 0                         | $Z_{w w }$  | $1.15 \times 10^{-6}$ kg/m      |
| $Y_v$       | 0.08 kg/s                  | $\dot{X}_w$      | $-1.13 \times 10^{-6}$ kg |             |                                 |

**Bảng 2.3: Tham số bộ điều khiển Backstepping**

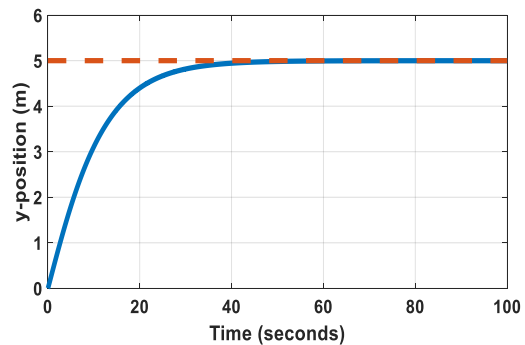
| Tham số   | Giá trị | Tham số     | Giá trị                             |
|-----------|---------|-------------|-------------------------------------|
| $k$       | 100     | $c_1$       | $c_1 = \text{diag} \{0.15 \ 0.12\}$ |
| $\delta$  | 5       | $c_2$       | $c_2 = \text{diag} \{90 \ 90\}$     |
| $k_1$     | 0.05    | $c_3$       | $c_3 = \text{diag} \{0.2 \ 0.2\}$   |
| $k_2$     | 5       | $c_4$       | $c_4 = \text{diag} \{0.1 \ 0.1\}$   |
| $\lambda$ | 500     | $\eta_{1d}$ | Constant                            |
| $\beta$   | 2.5     | $\eta_{2d}$ | Constant                            |

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:

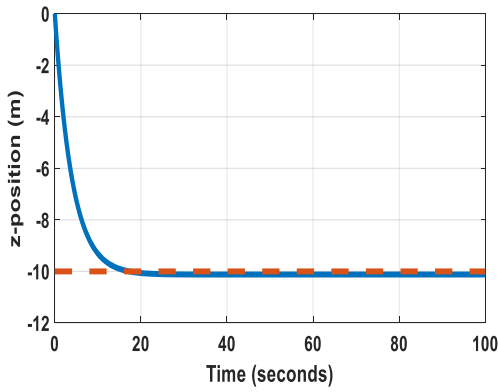
$$\eta_{1d} = [11 \ 5]^T \text{ và } \eta_{2d} = [-10 \ 0.3]^T$$



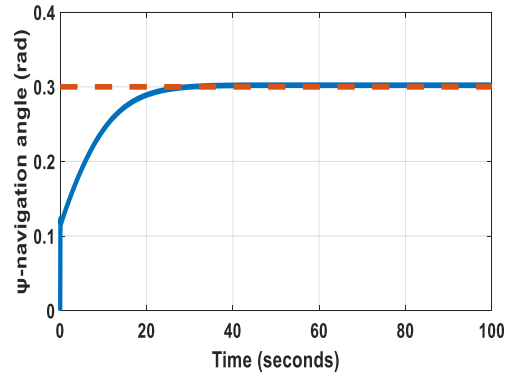
(a) Vị trí theo phương 0x



(b) Vị trí theo phương 0y



(c) Vị trí theo phương 0z



(d) Góc điều hướng của AUV

Hình 2.7. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 1 Backstepping

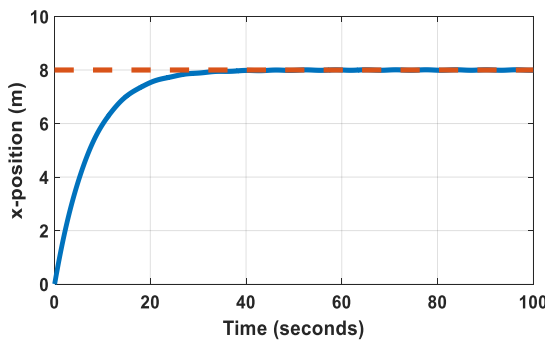
Phân tích kết quả mô phỏng trường hợp 1 bộ điều khiển Backstepping với tọa độ xuất phát của AUV là (0, 0, 0) và tọa độ đến là (11, 5, -10), góc điều hướng là 0.3 như hình 2.6.

- Thời gian xác lập nhanh với các vị trí theo phương 0x, 0y, 0z và góc điều hướng tương ứng với trường hợp 1 là: 25s, 30s, 18s, 22s

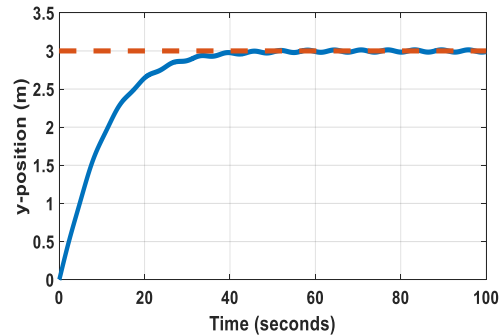
- Độ quá điều chỉnh trong kết quả mô phỏng các trạng thái chuyển động của thiết bị AUV khi sử dụng bộ điều khiển rất nhỏ do tọa độ đặt là điểm điểm và chưa có nhiễu tác động vào hệ thống. Để có kết quả mô phỏng khách quan hơn NCS xây dựng kịch bản mô phỏng trong trường hợp 2 có nhiễu điều hòa tác động.

Trường hợp 2: 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:

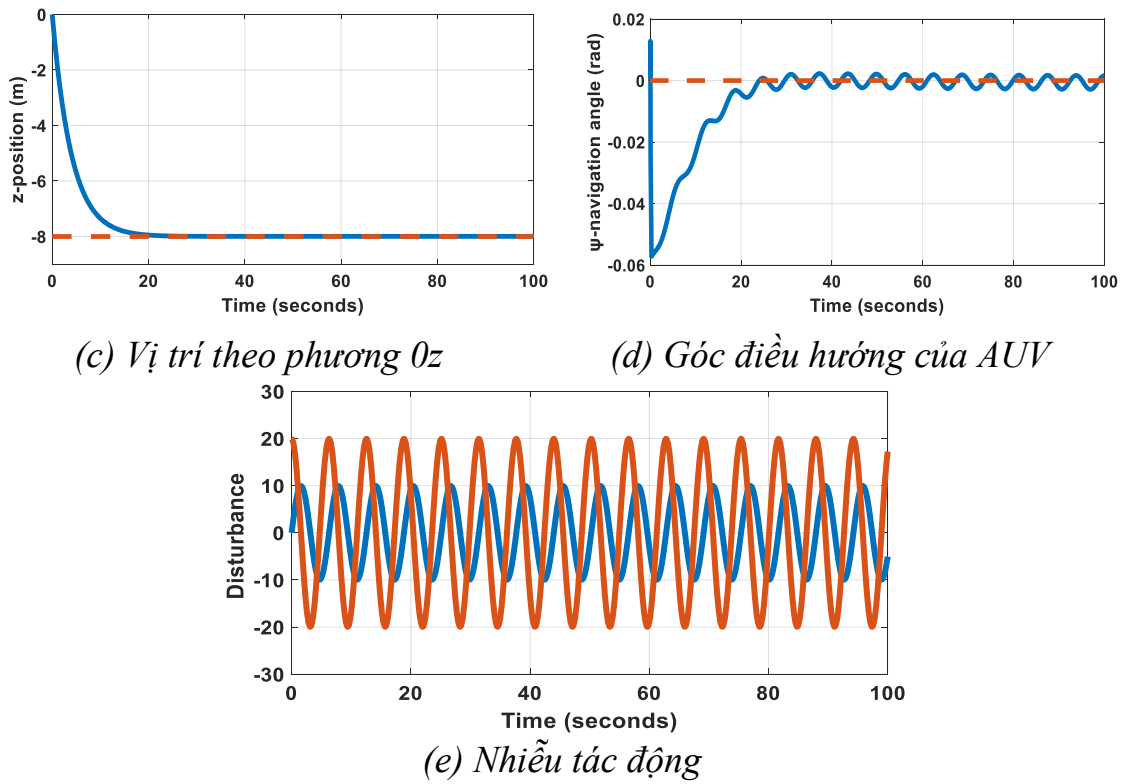
$$\Delta = [20\sin(0.01t) \ 10\cos(0.01t)]^T$$



(a) Vị trí theo phương 0x



(b) Vị trí theo phương 0y



Hình 2.8. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 2 Backstepping

Hình 2.8 cho thấy bộ điều khiển Backstepping cho chất lượng tốt ngay cả khi có nhiễu điều khiển tác động lên AUV. Cụ thể, với quỹ đạo đặt là hằng số và hàm điều hòa theo thời gian thì bộ điều khiển đều đáp ứng tốt và ít rung lắc, thời gian xác lập nhỏ. Tuy nhiên, góc điều hướng trong Hình 2.8.d có sai lệch tĩnh hơi lớn nhưng có thể chấp nhận được do vẫn nằm trong phạm vi 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 trong cả hai trường hợp là lặn sâu 8m và lặn sâu 10m với thời gian xác lập trong khoảng 20s ngay cả khi có nhiễu tác động trong trường hợp 2.

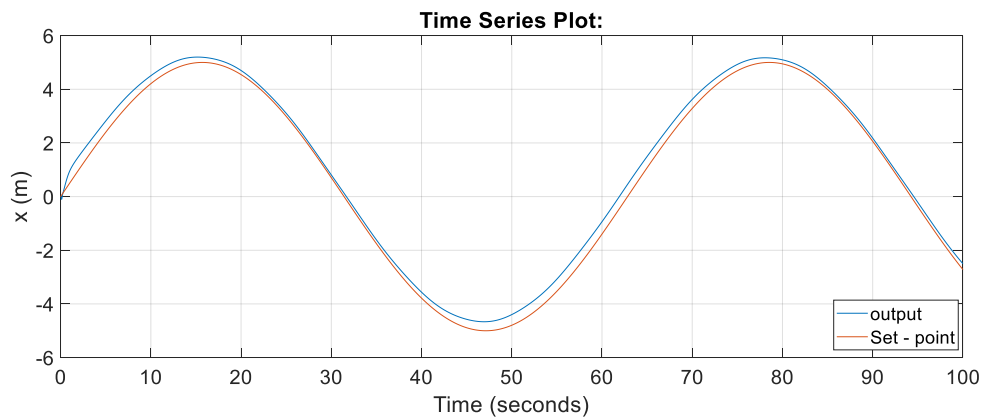
Tuy nhiên góc điều hướng trong trường hợp 2.8d có dao động nhỏ và không bám giá trị đặt so với trường hợp không có nhiễu ở trường hợp 2.7d vì kết quả mô phỏng góc điều hướng đã được cộng thêm phần nhiễu trong dao động bám quỹ đạo đặt. Để kiểm chứng thêm chất lượng bộ điều khiển NCS mô phỏng thêm trường hợp 3 với kích bản mô phỏng như sau:

Trường hợp 3: 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:  $\eta_{1d} = [5\sin(0.1t) \quad 4\cos(0.1t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-4 \quad 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [20\sin(0.01t) \quad 10\cos(0.01t)]^T$

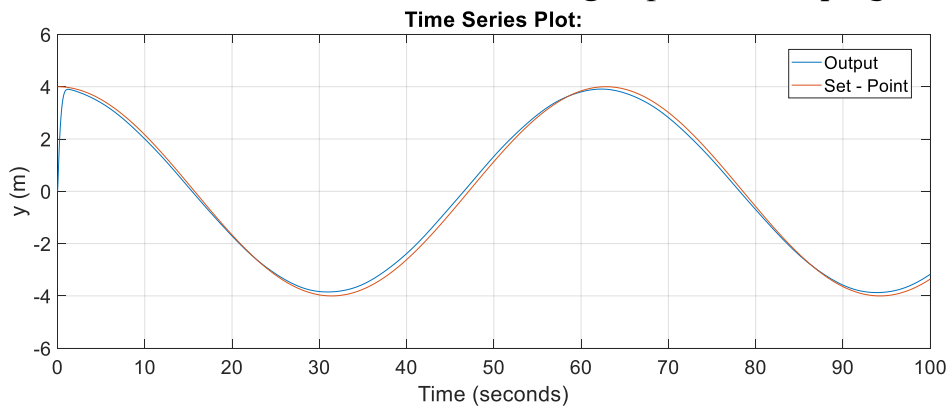
Trên phần mềm Matlap khai báo thông số hàm m-file các thông số giá trị đặt tọa độ xuất phát (tính từ mặt nước tạo độ  $x, y, z = 0, 0, 0$ ) và bám quỹ đạo điều hòa như sau:

```
n1d = [5*sin(0.1*t) 4*cos(0.1*t)]';
n2d = [-4 0]';
n1d_dot = [5*0.1*cos(0.1*t) -4*0.1*sin(0.1*t)]';
n2d_dot = [0 0]';
```

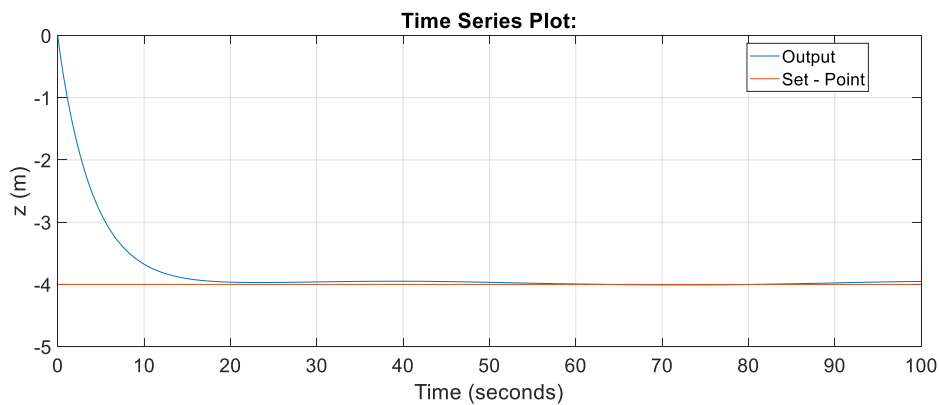
Đáp ứng quỹ đạo trong trường hợp 3 điều khiển Backstepping theo vị trí trục  $x, y, z$  như hình 2.8a, b, c.



Hình 2.9a. Vị trí theo trục  $x$  trường hợp 3 Backstepping



Hình 2.9b. Vị trí theo trục  $y$  trường hợp 3 Backstepping

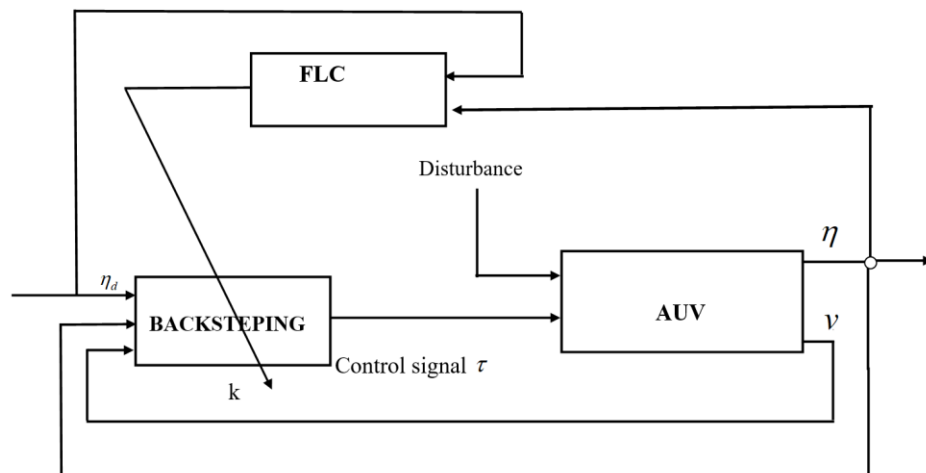


Hình 2.9c. Vị trí theo trục  $z$  trường hợp 3 Backstepping

Bộ điều khiển Backstepping đảm bảo hệ thống ổn định bám vị trí theo phương  $Ox, Oy, Oz$ ; 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 điều khiển khá tốt. Kết quả mô phỏng đã khẳng định được những ưu điểm của bộ điều khiển được đề xuất. Tuy nhiên khi sử dụng bộ điều khiển Backstepping thì các thông số của bộ điều khiển nhất là hệ số  $\alpha, \beta$  phụ thuộc rất nhiều vào kinh nghiệm của người làm điều khiển lựa chọn thông số của mô hình (như trong mô phỏng này lựa chọn  $\alpha = 0.65$ ,  $\beta = 0.05$ ). Để không phải lựa chọn cố định  $\alpha$  và  $\beta$  luận án đề xuất một phương pháp điều chỉnh  $\alpha$  và  $\beta$  dựa trên hệ mờ để so sánh chất lượng bám quỹ đạo với phương pháp điều khiển Backstepping thông thường.

## 2.4. Phân tích mô hình mô phỏng bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ (AFB)

### 2.4.1. Tổng hợp bộ điều khiển cho AUV bằng kỹ thuật Backstepping thích nghi mờ



Hình 2.10. Mô hình hệ thống điều khiển Backstepping thích nghi mờ

Tín hiệu đầu vào  $\eta_d = [x, y, z, \psi]^T$  là véc-tơ vị trí của AUV theo các trục  $Ox, Oy, Oz$  và góc điều hướng, gửi tín hiệu về bộ điều khiển Backstepping và bộ điều khiển mờ để cho ra tín hiệu điều khiển  $\tau$ ,  $v = [u, v, w, r]^T$  là véc-tơ vận tốc dài theo các phương  $Ox, Oy, Oz$  và tốc độ quay xung quanh trục  $Oz$ . Trả về bộ điều khiển Backstepping để so sánh với tín hiệu đặt.

FLC: Bộ điều khiển mờ; Disturbance: Nhiều

Tín hiệu điều khiển  $\tau$  tính theo  $\tau_1, \tau_2$  phụ thuộc vào tham số của bộ điều khiển theo phương trình (2.80):

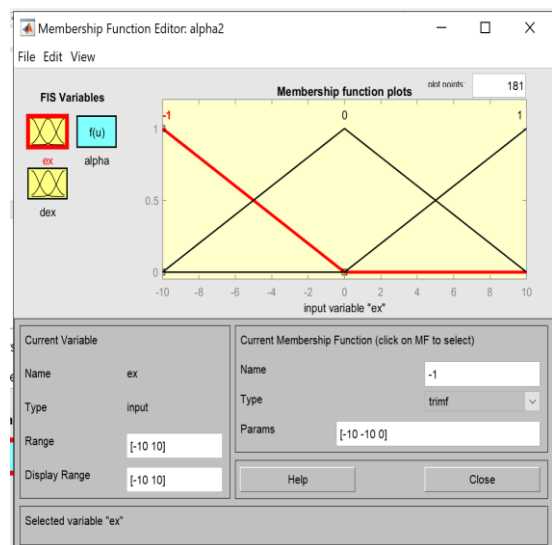
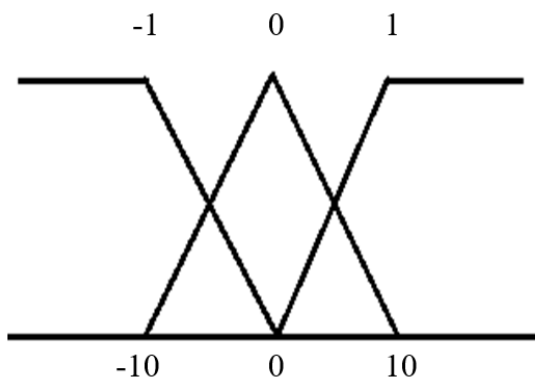
$$\tau = \alpha \cdot g_1^{-1}(\mathbf{X})(-c_2 e_2 - J_{11}^T e_1 - f_1(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_1) + \beta \cdot g_2^{-1}(\mathbf{X})(-c_4 e_4 - J_{22}^T e_3 - f_2(\mathbf{X}) + \dot{\alpha}_2)$$

Khi chọn  $\alpha, \beta$  là cố định thì trong hệ thống tồn tại hiện tượng rung lắc nhiều. Nhằm giảm bớt hiện tượng rung lắc, luận án đề xuất một phương pháp điều chỉnh  $\alpha$  và  $\beta$  dựa trên hệ mờ. Hệ mờ được thiết kế nhằm thay đổi dựa trên việc chỉnh định hai tham số  $\alpha$  và  $\beta$ . Thực chất chỉ cần thay đổi một trong hai tham số cũng thay đổi được mặt trượt nên coi  $\alpha$  có ràng buộc tuyến tính với  $\beta$ :

$$\beta = k \cdot \alpha$$

Do thiết kế hệ mờ chủ yếu là dựa trên kinh nghiệm của người điều khiển nên tương ứng với một giá trị  $\alpha > 0$  lại thu được một hệ mờ thích hợp với luật chỉnh định. Đầu vào của hệ logic mờ là  $e_1, \dot{e}_1$  và đầu ra là  $\alpha$ .

Mỗi biến ngôn ngữ đầu vào gồm 3 tập mờ hình tam giác với tên của các tập mờ được số hóa lần lượt là  $[-1 \ 0 \ 1]$  với độ rộng của hàm tam giác là  $[-10 \ 0 \ 10]$ , có hàm liên thuộc các biến ngôn ngữ đầu vào được biểu diễn ở hình 2.10 và khai báo như hình 2.11. Các biến đầu ra là hằng số có tên được số hóa là  $[-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2]$ , tương ứng với các giá trị  $[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5] = [3 \ 2.5 \ 2 \ 2.5 \ 3]$ . Với luật suy diễn như bảng 2.4:



Hình 2.11. Tập mờ của các biến ngôn ngữ đầu vào

**Bảng 2.4: Hệ suy diễn cho bộ điều khiển Backstepping thích nghi mờ**

| $\alpha$ |    | $e_1$ |    |    |
|----------|----|-------|----|----|
|          |    | -1    | 0  | 1  |
| $e_1$    | 1  | 0     | -1 | -2 |
|          | 0  | 1     | 0  | -1 |
|          | -1 | 2     | 1  | 0  |

Luật suy diễn lấy từ bảng 2.4 được viết và khai báo trên phần mềm Matlab như sau:

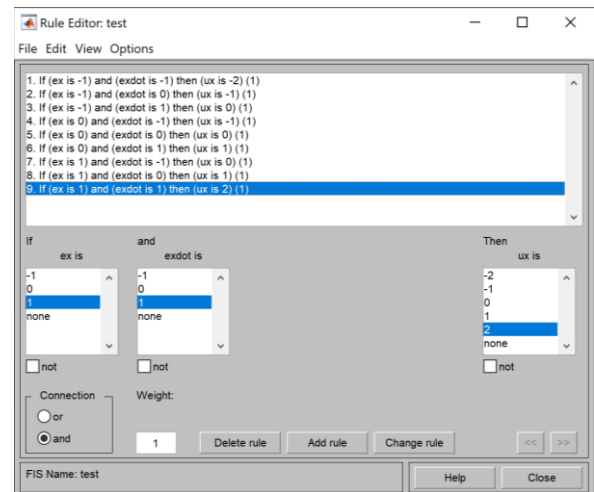
R1: Nếu  $e_1 = -2$ ,  $e_1' = 0$  thì  $\alpha = 1$

R2: Nếu  $e_1 = -1$ ,  $e_1' = 0$  thì  $\alpha = 0$

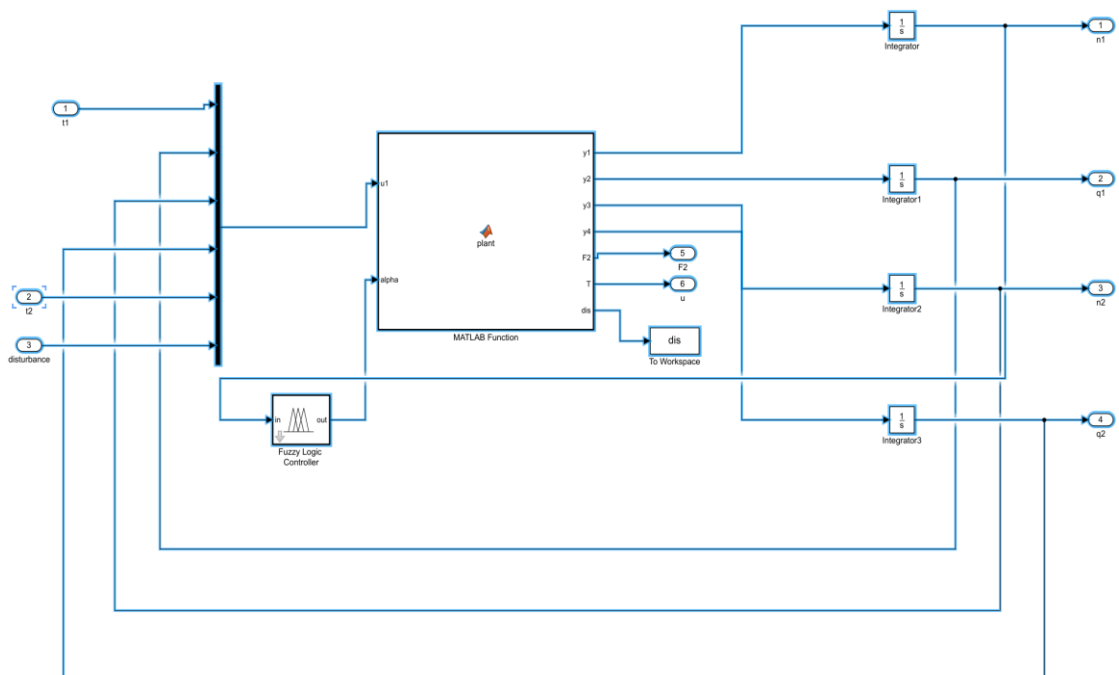
R3: Nếu  $e_1 = 0$ ,  $e_1' = 1$  thì  $\alpha = -1$

•  
•

R9: Nếu  $e_1 = 1$ ,  $e_1' = 0$  thì  $\alpha = 1$



#### 2.4.2. Mô hình mô phỏng hệ điều khiển Backstepping thích nghi mờ



Hình 2.12. Sơ đồ khối Plant mô phỏng điều khiển backstepping Fuzzy cho AUV 4 DOF trên Matlab simulink

Để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển Backsepping thích nghi mờ (AFB), mô phỏng đã thực hiện cho đối tượng thiết bị lặn tự hành AUV với các bộ tham số sau:

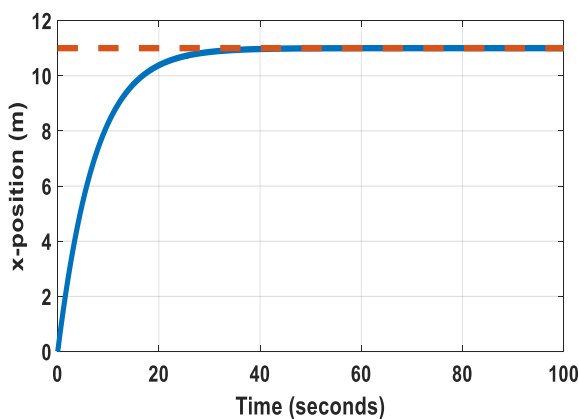
**Tham số mô hình thiết bị AUV [17] như bảng 2.2**

**Bảng 2.5: Tham số bộ điều khiển AFB**

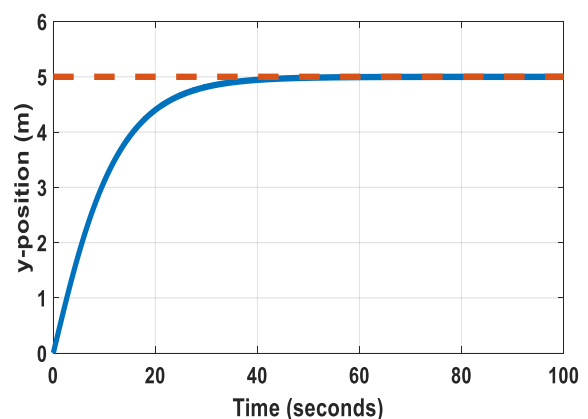
| Tham số     | Giá trị  | Tham số                         | Giá trị                             |
|-------------|----------|---------------------------------|-------------------------------------|
| $k$         | 100      | $c_1$                           | $c_1 = \text{diag} \{0.15 \ 0.12\}$ |
| $\delta$    | 5        | $c_2$                           | $c_2 = \text{diag} \{90 \ 90\}$     |
| $k_1$       | 0.05     | $c_3$                           | $c_3 = \text{diag} \{0.2 \ 0.2\}$   |
| $k_2$       | 5        | $c_4$                           | $c_4 = \text{diag} \{0.1 \ 0.1\}$   |
| $\eta_{1d}$ | Constant | $[c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4 \ c_5]$ | $[ \ 3 \ 2.5 \ 2 \ 2.5 \ 3]$        |
| $\eta_{2d}$ | Constant |                                 |                                     |

Dưới đây là kịch bản mô phỏng với hai trường hợp có nhiễu và không có nhiễu cụ thể như sau:

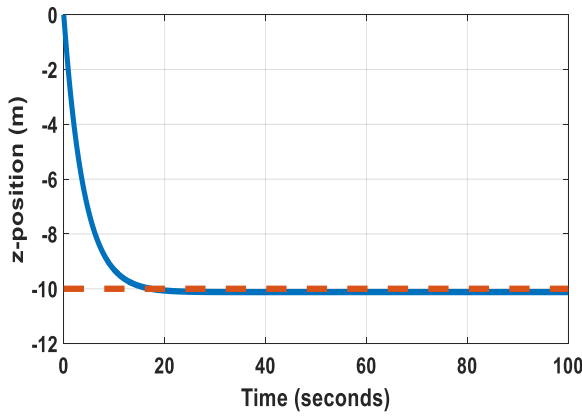
Trường hợp 1: Phương tiện chuyển động ngầm tự hành AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [11 \ 5]^T$  và  $\eta_{2d} = [-10 \ 0.3]^T$



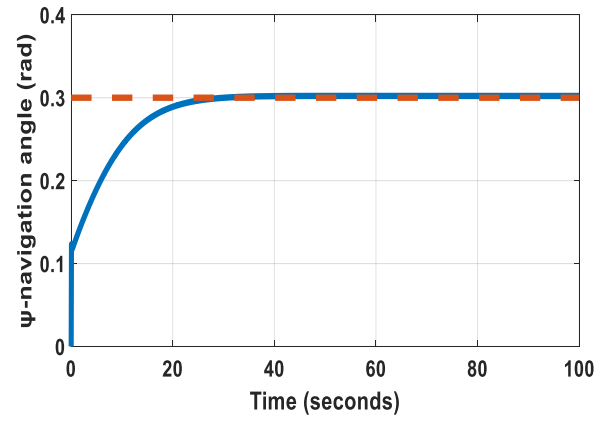
(a) Vị trí theo phương 0x



(b) Vị trí theo phương 0y



(c) Vị trí theo phương 0z

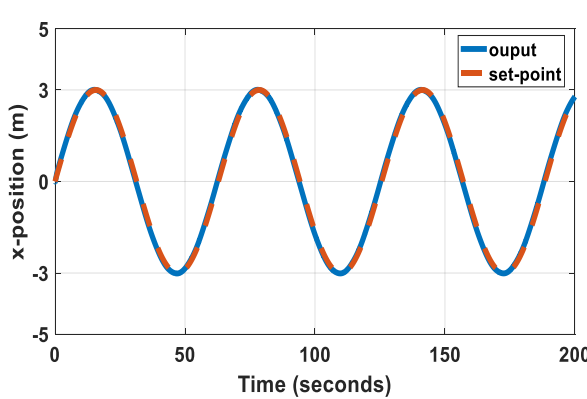


(d) Góc điều hướng của AUV

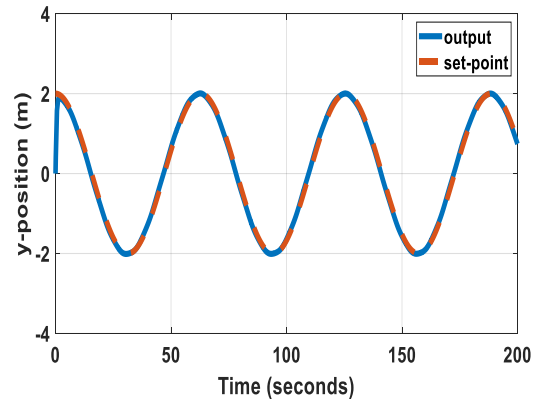
Hình 2.13. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 1 AFB

Trường hợp 2: 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 :

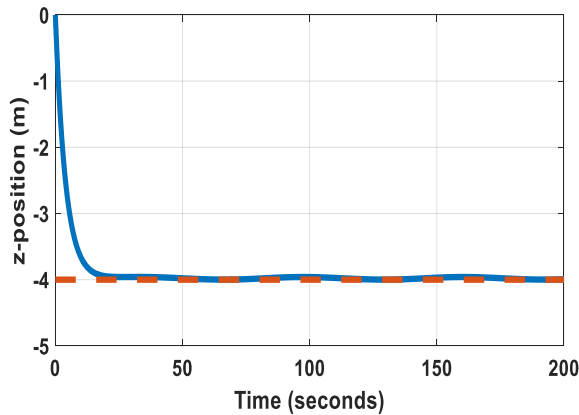
$$\Delta = [20\sin(0.01t) \ 10\cos(0.01t)]^T$$



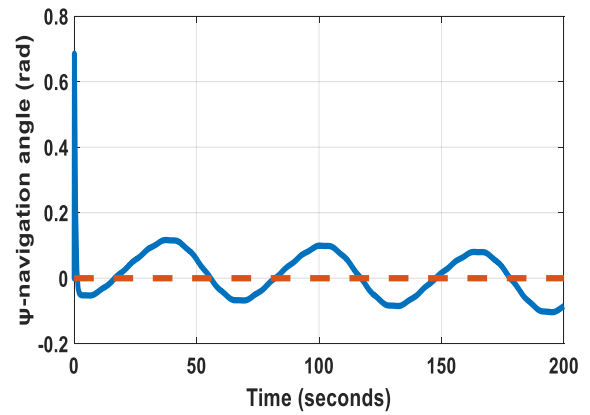
(a) Vị trí theo phương 0x



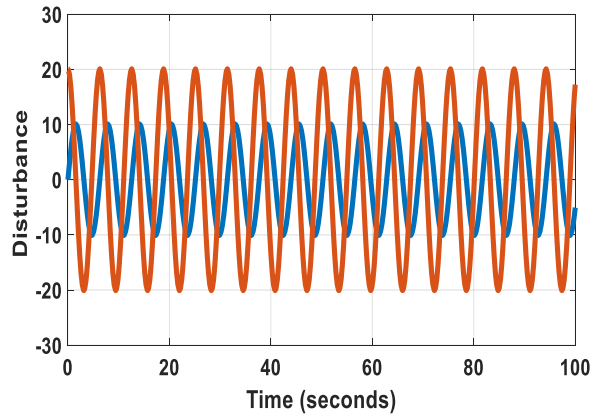
(b) Vị trí theo phương 0y



(c) Vị trí theo phương 0z



(d) Góc điều hướng của AUV



(e) Nhiều tác động

Hình 2.14. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 2 AFB

Kết quả mô phỏng hình 2.12, 2.13 cho thấy bộ điều khiển Adaptive Fuzzy Backstepping (AFB) 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 với các vị trí theo phương  $0x, 0y, 0z$  và góc điều hướng tương ứng với trường hợp 1, 2 lần lượt là: 18s, 20s, nhỏ hơn so với trường hợp bộ điều khiển Backstepping. Góc điều hướng trong hình 2.12.d và 2.13.d có sai lệch tĩnh và quá điều chỉnh nhỏ gần như bằng không. Bên cạnh đó bộ điều khiển Backstepping cho chất lượng đáp ứng vị trí và độ sâu của thiết bị AUV tốt hơn.

Như vậy bộ điều khiển Adaptive Fuzzy Backstepping (AFB) đảm bảo hệ thống ổn định bám vị trí theo phương  $0x, 0y, 0z$ ; giảm thiểu biên độ góc điều hướng và sai lệch tiến về 0. Để so sánh chất lượng điều khiển của Backstepping với Backstepping Fuzzy NCS tiến hành mô phỏng các đường đặc tính đáp ứng theo các trục trên cùng một đồ thị như sau.

## 2.5. So sánh kết quả mô phỏng bộ điều khiển Backstepping với Backstepping thích nghi mờ (AFB)

Khai báo hàm m-file trên Matlab các thông số so sánh hai bộ điều khiển với 3 bộ thông số để lấy đường đặc tính (blue, red, black) trên cùng một đồ thị và 5 hình vẽ (figure 1 – figure 5) gồm các đáp ứng theo trục x của AUV (hình 2.16a), đáp ứng theo trục y (hình 2.16b), đáp ứng góc điều hướng (hình 2.16c), đáp ứng theo trục z (hình 2.14d) và đáp ứng theo quỹ đạo x, y (hình 2.16e) như sau:

Khai báo các thông số để lấy đường đặc tính cho đồ thị hình 1 của trục y với tham số dữ liệu là a. timer theo thời gian và a.data

```
close all;
figure(1),
plot(b.time,b.Data(:,1),'blue','linewidth',3.0); hold on;
plot(b.time,y.Data,'red','linewidth',3.0);
plot(b.time,b.Data(:,2),'black--','linewidth',3.0);
legend('y - Backstepping','y - Fuzzy Backstepping', 'y -
Reference');
grid on; xlabel('time [secs]');
```

Khai báo các thông số để lấy đường đặc tính cho đồ thị hình 2 của trục x với tham số dữ liệu là a. timer theo thời gian và a.data

```
figure(2),
plot(a.time,a.Data(:,1),'blue','linewidth',3.0); hold on;
plot(a.time,x.Data,'red','linewidth',3.0);
plot(a.time,a.Data(:,2),'black--','linewidth',3.0);
legend('x - Backstepping','x - Fuzzy Backstepping', 'x -
Reference');
grid on; xlabel('time [secs]');
```

Khai báo các thông số để lấy đường đặc tính cho đồ thị hình 3 của trục z với tham số dữ liệu là c. timer theo thời gian và c.data

```
figure(3),
plot(c.time,c.Data(:,1),'blue','linewidth',3.0); hold on;
plot(c.time,z.Data,'red','linewidth',3.0);
plot(c.time,c.Data(:,2),'black--','linewidth',3.0);
legend('z - Backstepping','z - Fuzzy Backstepping', 'z -
Reference');
grid on; xlabel('time [secs]');
```

Khai báo các thông số để lấy đường đặc tính cho đồ thị hình 4 của góc theta với tham số dữ liệu là d. timer theo thời gian và d.data

```
figure(4),
plot(d.time,d.Data(:,1),'blue','linewidth',3.0); hold on;
```

```

plot(d.time,theta.Data,'red','linewidth',3.0);
plot(d.time,d.Data(:,2),'black--','linewidth',3.0);
legend('\theta - Backstepping','\theta - Fuzzy
Backstepping','\theta - Reference');
grid on; xlabel('time [secs]');

```

Khai báo các thông số để lấy đường đặc tính cho đồ thị hình 5 theo x, y trong không gian 2 chiều.

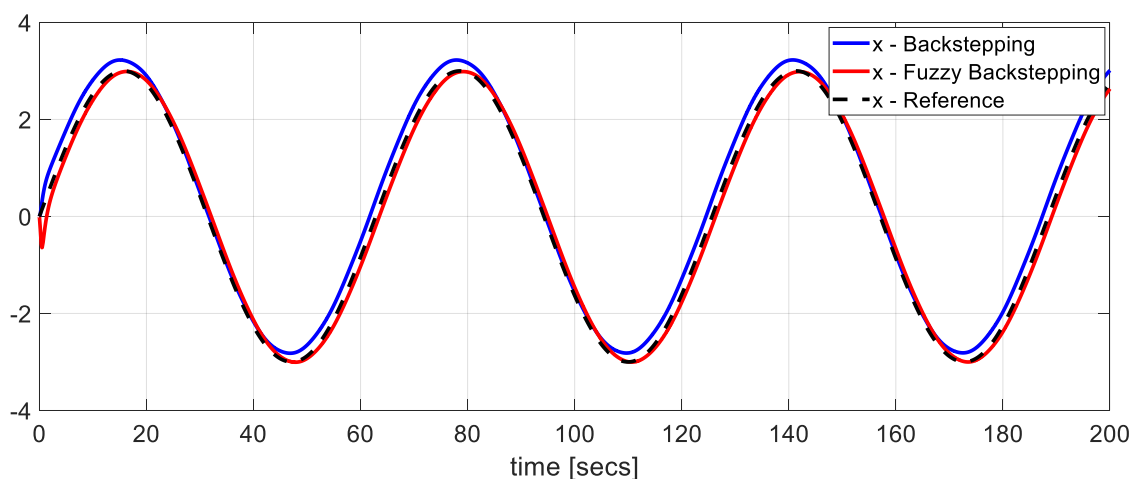
```

figure(5), plot(x.Data,y.Data,'red','linewidth',3.0); hold
on;
plot(a.Data(:,1),b.Data(:,1),'blue','linewidth',3.0);
plot(a.Data(:,2),b.Data(:,2),'black--','linewidth',3.0);
xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]');
legend('Fuzzy Backstepping','Backstepping','Desired
Trajectory');

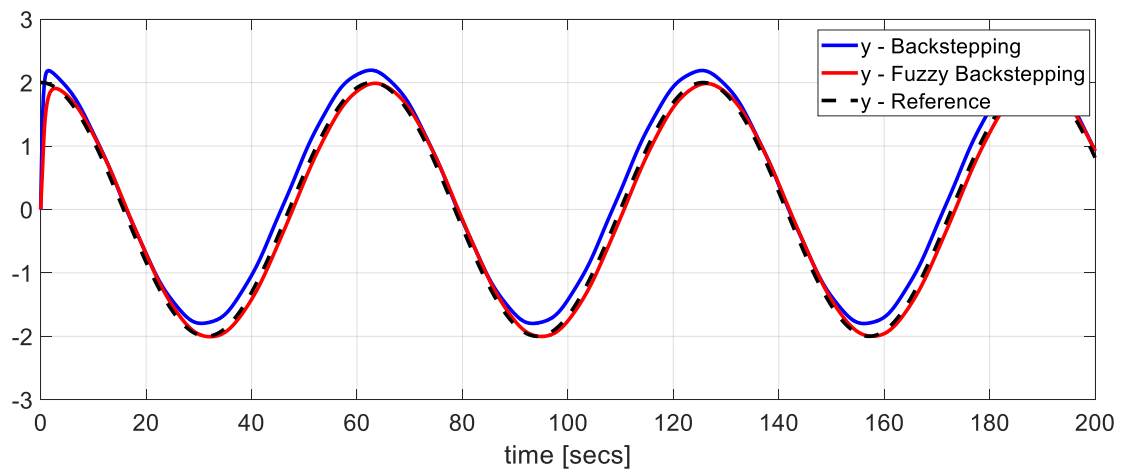
```

Kịch bản mô phỏng trên cùng 1 đồ thị 3 đường đặc tính với độ rộng biên độ cùng bằng 3 mét theo trục x, 2 mét theo trục y như sau:

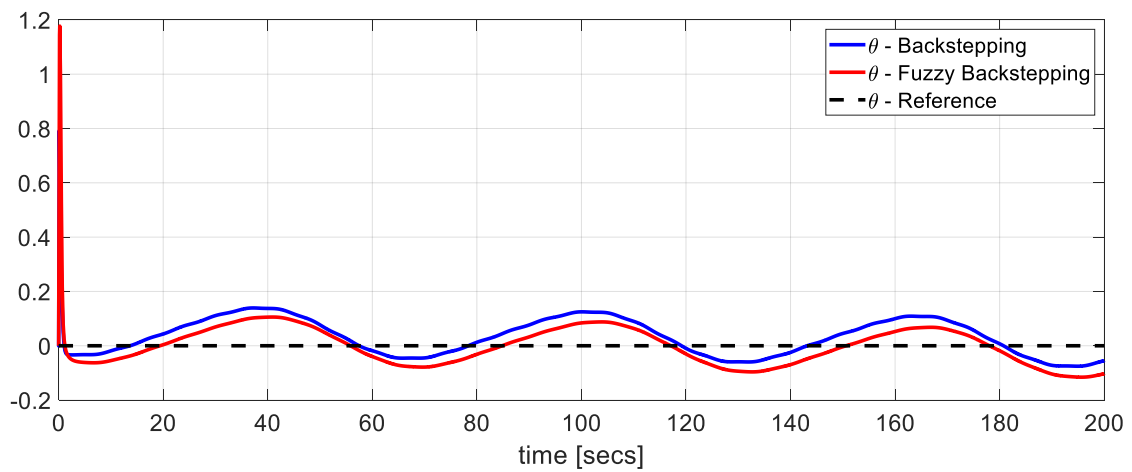
Trường hợp 1: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \ 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-10 \ 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [20\sin(0.01t) \ 10\cos(0.01t)]^T$



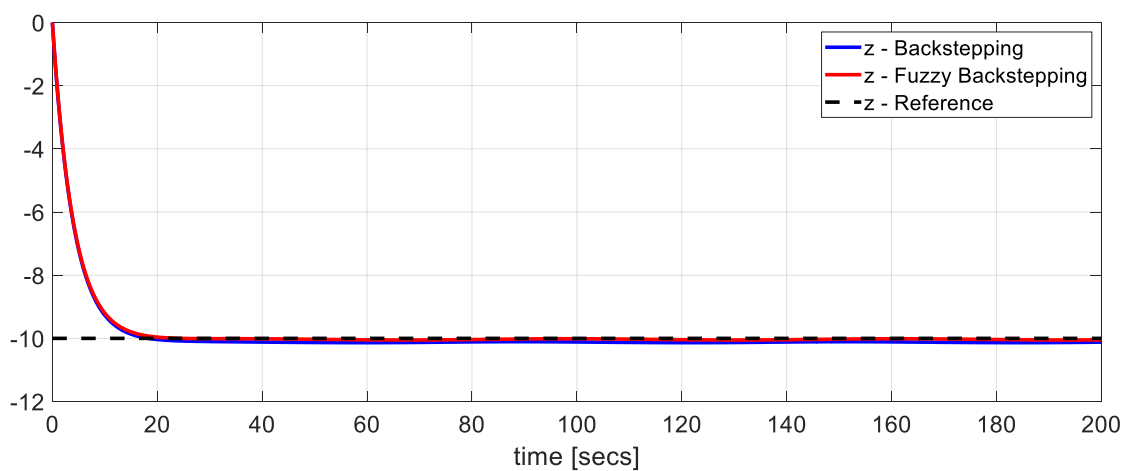
Hình 2.15a. Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1



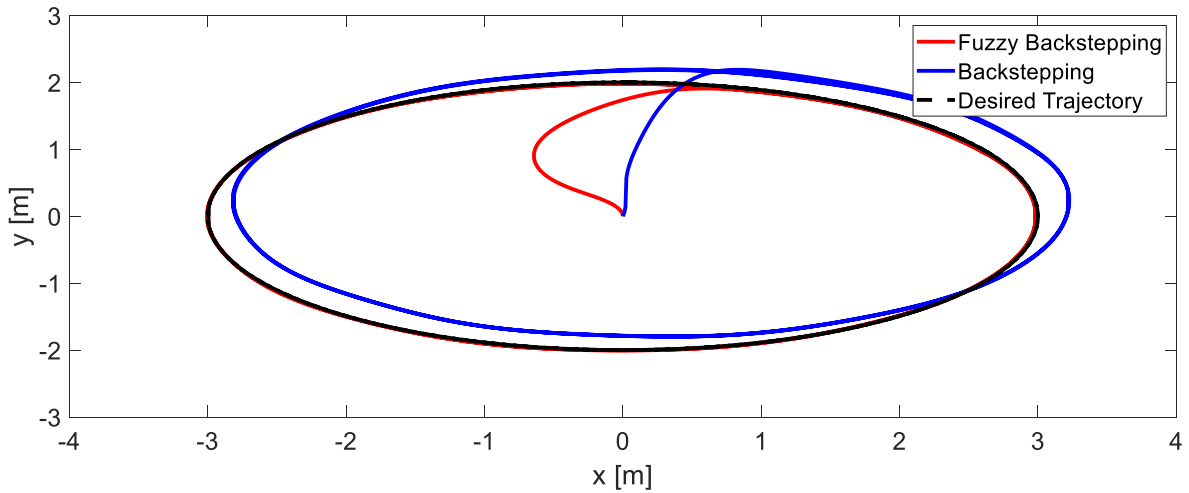
Hình 2.15b. Đáp ứng theo trục  $y$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1



Hình 2.15c. Đáp ứng góc điều hướng của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1



Hình 2.15d. Đáp ứng theo trục  $z$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1

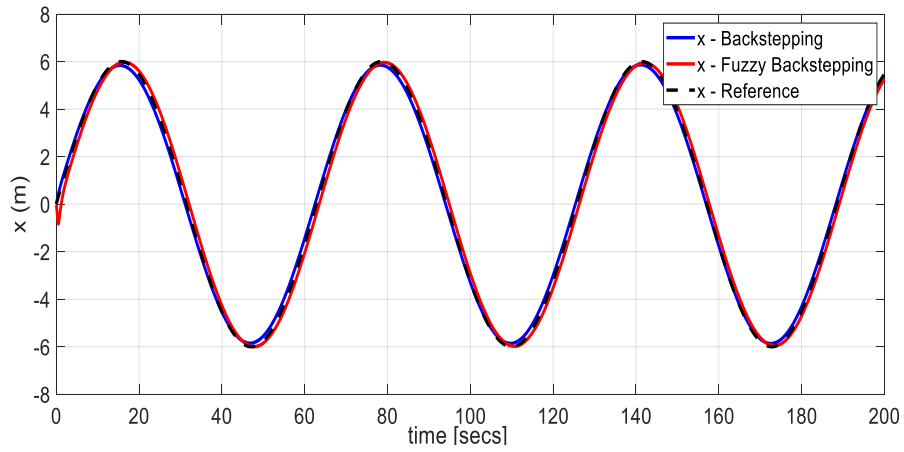


Hình 2.15e. Quỹ đạo theo trục  $x, y$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 1

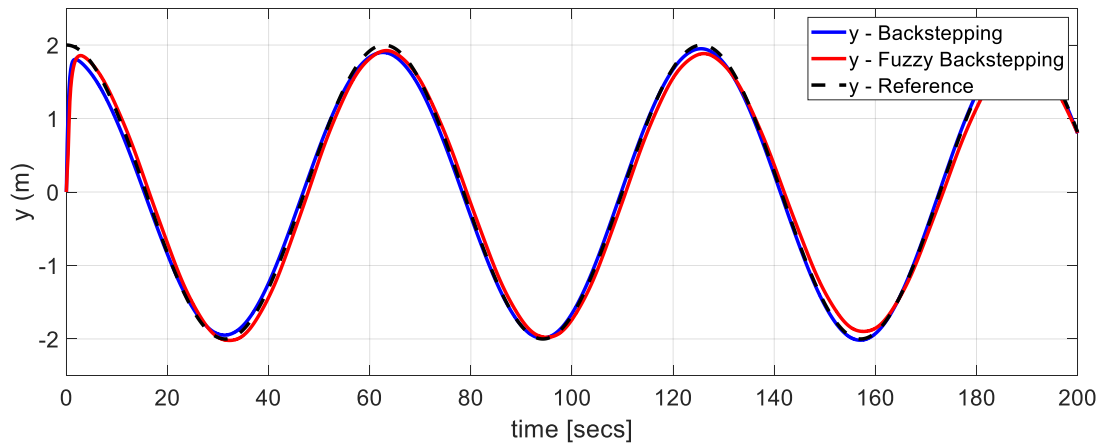
Nhận xét: Hình 2.16 a, b, c, d, e mô phỏng đáp ứng của AUV trong trường hợp 1 theo các trục vị trí, độ sâu và góc điều hướng. Mô phỏng các đáp ứng trên cùng một đồ thị sẽ nhìn thấy ngay những đáp ứng tốt hơn của bộ điều khiển Backstepping Fuzzy so với Backstepping thông thường, như trong đồ thị hình 2.16a,b thì quỹ đạo theo trục  $x, y$  của Backstepping Fuzzy gần với tín hiệu đặt hơn so với đáp ứng quỹ đạo  $x, y$  của Backstepping, độ quá điều chỉnh cũng nhỏ hơn. Hình 2.16e có thể thấy ngay quỹ đạo điều khiển của Backstepping Fuzzy bám quỹ đạo đặt tốt hơn rất nhiều so với bộ điều khiển Backstepping.

Bộ điều khiển Backstepping AUV bám vị trí đặt sau khoảng 18 giây và độ quá điều chỉnh tối đa rất nhỏ theo phương  $x$  và theo phương  $y$ . Do đó, bộ điều khiển Backstepping Fuzzy đáp ứng bám quỹ đạo tốt hơn khi có ảnh hưởng của nhiễu ngoài. Kết quả mô phỏng so sánh chất lượng giữa Backstepping và Backstepping Fuzzy khẳng định chất lượng điều khiển bám quỹ đạo trong trường hợp sử dụng Backstepping Fuzzy đã tốt hơn rất nhiều so với bộ điều khiển Backstepping thông thường. Luận án tiếp tục thử nghiệm so sánh trong trường hợp 2 với các thông số như sau:

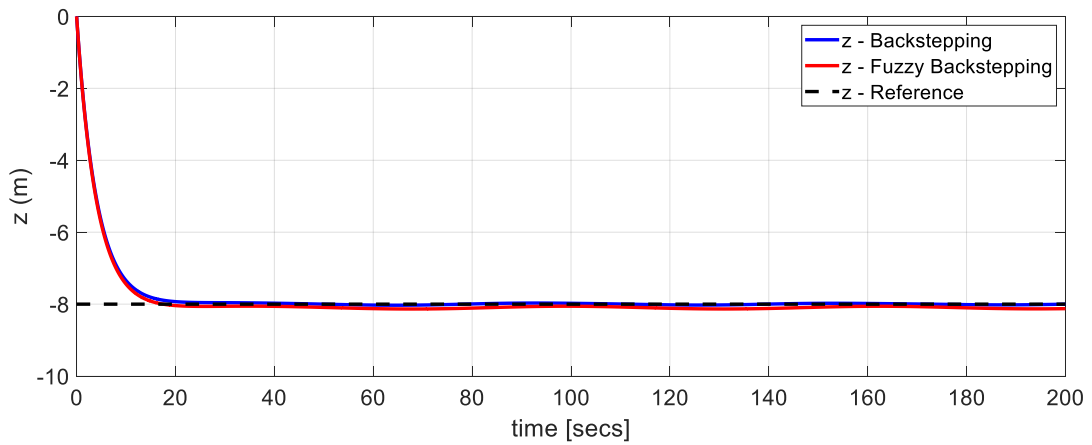
Trường hợp 2: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -8 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [6\sin(0.01t) \quad 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-8 \quad 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [20\sin(0.01t) \quad 10\cos(0.01t)]^T$



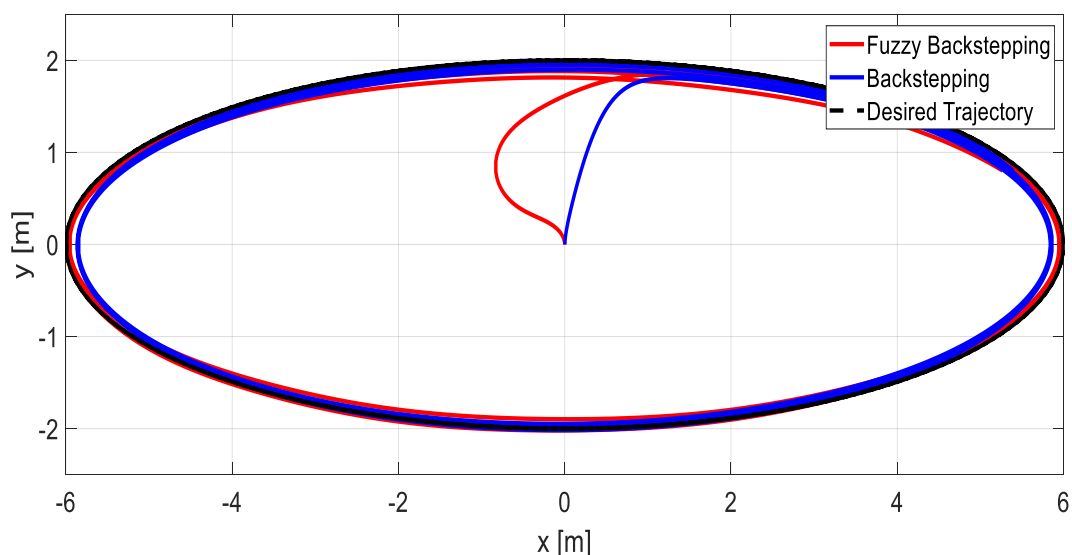
Hình 2.16a. Đáp ứng theo trục  $x$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2



Hình 2.16b. Đáp ứng theo trục  $y$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2

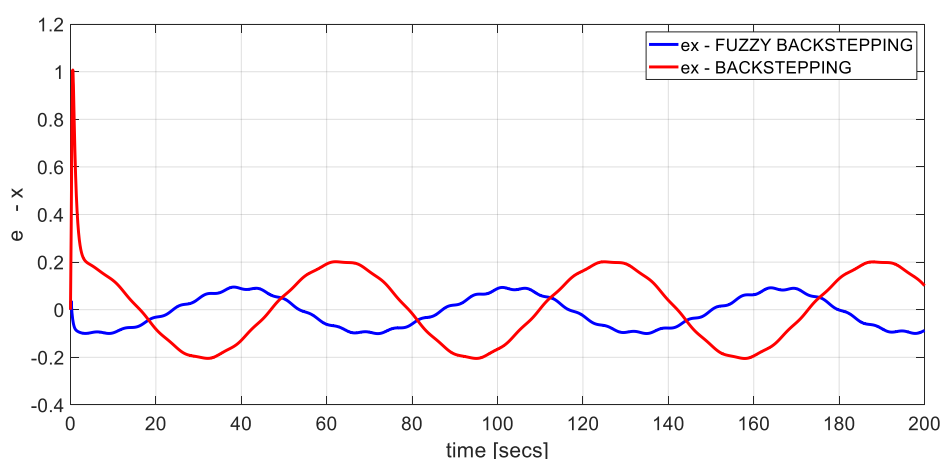


Hình 2.16c. Đáp ứng theo trục  $z$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2

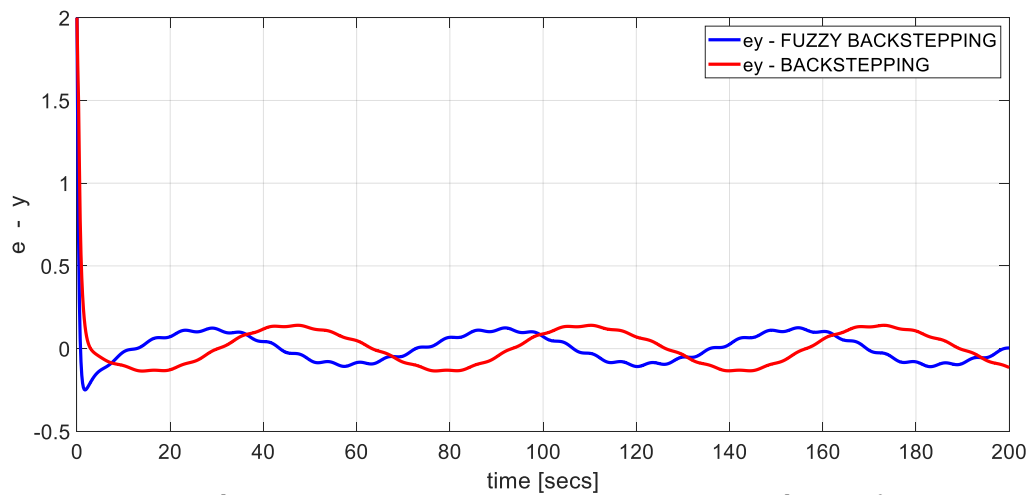


Hình 2.16d. Quỹ đạo theo trục  $x, y$  của AUV với 2 bộ điều khiển BCS và AFB trường hợp 2

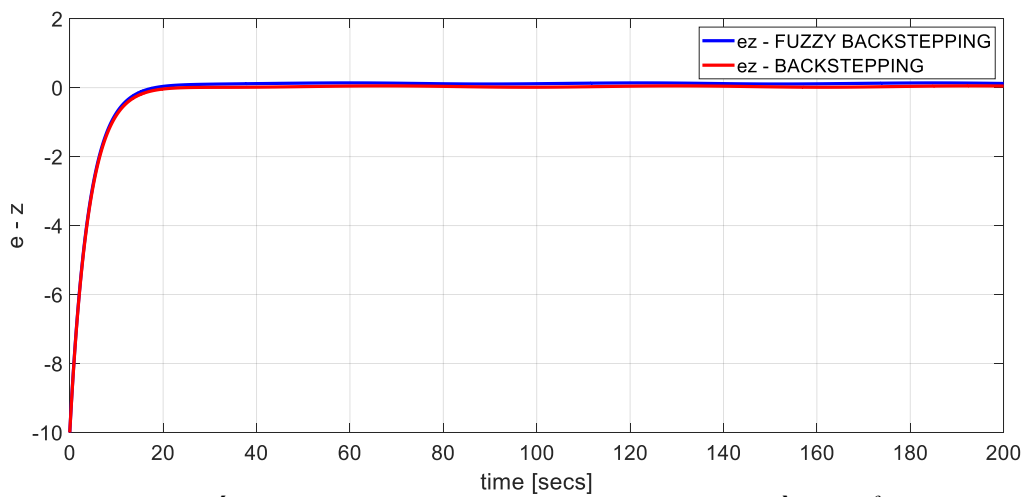
Bộ điều khiển BCS và bộ điều khiển AFB mà luận án đề xuất đều mang lại chất lượng tốt ngay cả khi có nhiễu ngoài tác động vào AUV. Tuy nhiên chất lượng điều khiển khi sử dụng bộ điều khiển AFB được cải thiện tốt hơn rất nhiều thông qua đồ thị so sánh sai số của 2 bộ điều khiển so với tín hiệu đặt như sau:



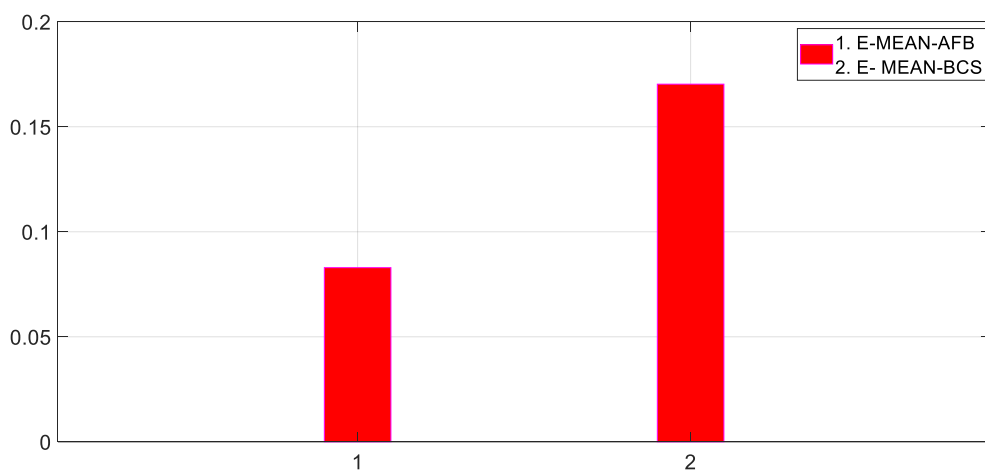
Hình 2.17a. Sai số so với tín hiệu đặt trục  $x$  của 2 bộ điều khiển BCS và AFB



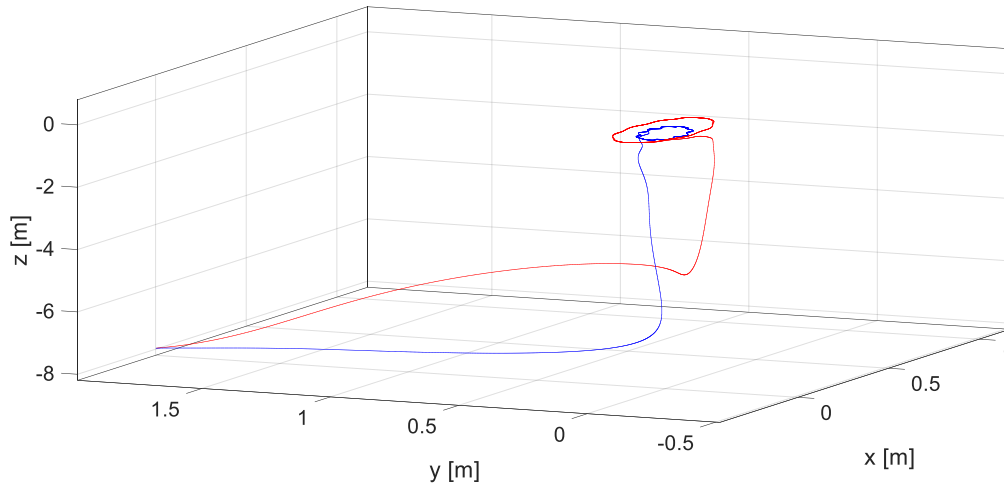
Hình 2.17b. Sai số so với tín hiệu đặt trực y của 2 bộ điều khiển BCS và AFB



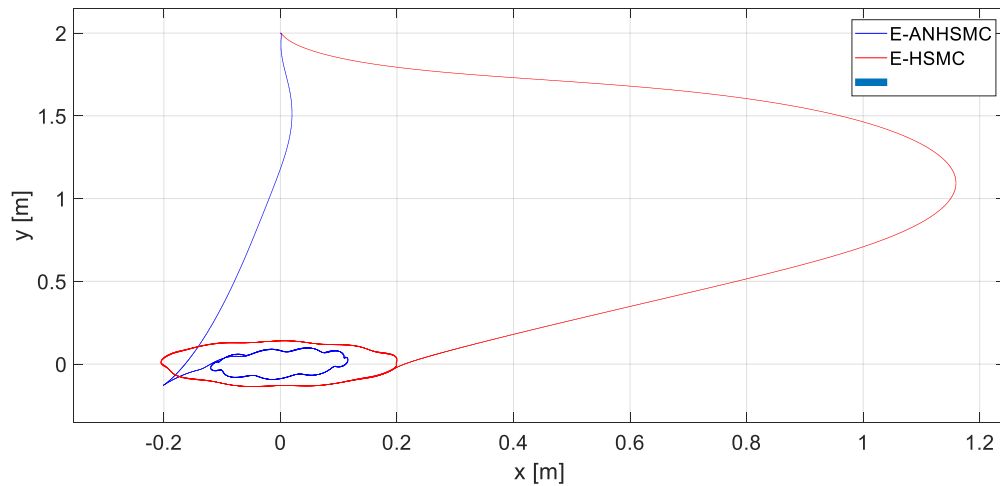
Hình 2.17c. Sai số so với tín hiệu đặt trực z của 2 bộ điều khiển BCS và AFB



Hình 2.17d. Sai số trung bình với tín hiệu đặt của 2 bộ điều khiển BCS và AFB



Hình 2.17e. Sai số trong không gian 3D của 2 bộ điều khiển BCS và AFB



Hình 2.17f. Sai số trong không gian 2D của 2 bộ điều khiển BCS và AFB

Các đồ thị khẳng định ưu điểm của bộ điều khiển AFB, với sai số theo trục x nhỏ hơn khoảng 0,2 so với 0,1 (hình 2.17a), sai số trung bình BCS gấp đôi so với AFB (hình 2.17d) điểm tiệm cận bao xung quanh gốc tọa độ của BCS cũng gấp đôi so với AFB (hình 2.17f). Như vậy trong trường hợp mô hình khó xác định và muốn có bộ điều khiển cài đặt đơn giản thì nên dùng AFB. Nhưng để thiết kế được AFB thì đòi hỏi người sử dụng phải đầu tư rất nhiều thời gian để tự thu thập kinh nghiệm lựa chọn ra thông số bộ điều khiển phù hợp. Trong trường hợp không muốn đầu tư thời gian vào thiết kế thì người sử dụng nên chọn BCS. Để so sánh chất lượng điều khiển của AFB với các bộ điều khiển khác phù hợp với phương pháp điều khiển thiếu cơ cấu chấp hành NCS tiếp tục

ngiên cứu các bộ điều khiển khác để nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của AUV.

**Kết luận chương 2:** Trong chương này NCS nghiên cứu lý thuyết cơ sở bộ điều khiển, xây dựng được thuật toán điều khiển Backstepping và Backstepping thích nghi mờ (AFB) cho mô hình tàu AUV 4 bậc tự do, bộ điều khiển chính là công trình kết hợp kỹ thuật điều khiển hiện đại với điều khiển thông minh tạo thành một hệ thống kín nhằm nâng cao chất lượng điều khiển cho AUV có thành phần bất định dạng hàm số.

Thông qua kết quả mô phỏng có thể khẳng định bộ điều khiển Backstepping và Backstepping thích nghi mờ phù hợp để điều khiển cho đối tượng AUV thiếu cơ cấu chấp hành đảm bảo hệ thống bám quỹ đạo theo phương  $O_x, O_y, O_z$ ; giảm thiểu biên độ góc điều hướng và sai lệch tiến về 0. Tuy nhiên nếu ở môi trường đại dương, các thông số của ma trận  $C(v), D(v)$  này rất khó có thể được xác định. Hơn nữa từ biểu thức (2.80) có thể thấy luật điều khiển là biểu thức phức tạp gồm nhiều toán hạng. Do trong kỹ thuật backstepping, luật điều khiển của hệ sau phụ thuộc vào đạo hàm của luật điều khiển hệ con phía trước gây ra hiện tượng bùng nổ toán hạng trong kỹ thuật Backstepping nhất là khi hệ thống có nhiều bậc.

Để khắc phục những khó khăn trong việc xác định các thông số bất định hàm của  $C(v), D(v)$  cũng như các nhiễu tác động từ môi trường đại dương. Trong phần tiếp theo nghiên cứu NCS sẽ kết hợp các bộ điều khiển phi tuyến khác để tối ưu hơn nữa thuật toán điều khiển nhằm nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho AUV thiếu cơ cấu chấp hành đã xây dựng. Đem lại cho hệ thống cấu hình điều khiển vừa thích nghi với quỹ đạo mong muốn vừa bền vững với nhiễu đến từ đại dương. Đây chính là mục tiêu hướng tới của luận án.

### **Chương 3.**

## **ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TÀNG THÍCH NGHI NƠ RON NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN CHO AUV THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH**

Backstepping là phương pháp điều khiển phi tuyến chuyển đổi trạng thái bằng cách thiết lập các hàm Backstepping, tạo ra các tín hiệu điều khiển để đạt được các yêu cầu về chất lượng. Bộ điều khiển Backstepping cho phép điều chỉnh và tinh chỉnh các hàm Backstepping dựa trên yêu cầu cụ thể của hệ thống. Tuy nhiên hiện tượng trượt trong quá trình điều khiển có thể xảy ra làm cho hệ thống mất ổn định hoặc không đạt được chất lượng điều khiển mong muốn. Một số nguyên nhân có thể kể đến như sau, thứ nhất khi áp dụng điều khiển Backstepping, một hàm Lyapunov được sử dụng để đảm bảo sự ổn định của hệ thống. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, giới hạn của hệ thống có thể gây ra sự không liên tục hoặc không đủ liên tục trong hàm Lyapunov, dẫn đến hiện tượng trượt. Thứ hai trong thực tế, hệ thống điều khiển thường bị ảnh hưởng bởi sai số và nhiễu từ cảm biến, động cơ, môi trường và các yếu tố khác ....làm biến đổi đáng kể các thông số của hệ thống và gây ra hiện tượng trượt trong quá trình điều khiển. Thứ ba việc lựa chọn không tối ưu hoặc không chính xác các thông số và tham số của bộ điều khiển cũng có thể góp phần vào hiện tượng này [33].

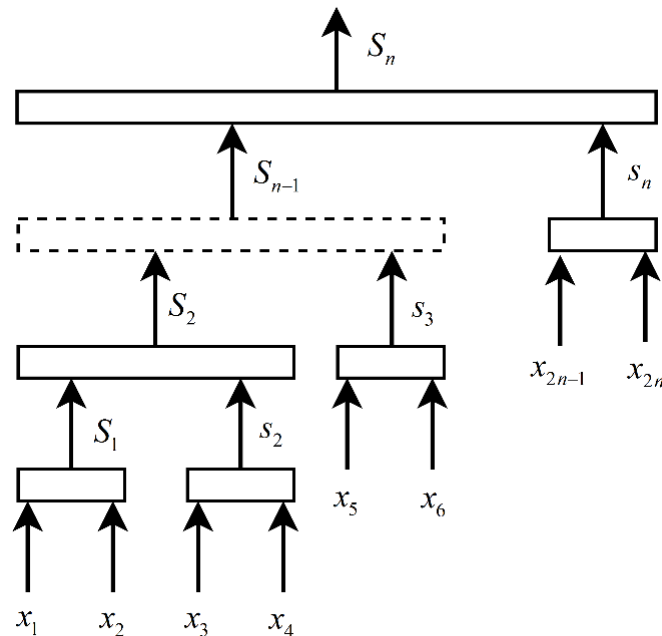
Điều khiển mờ (fuzzy control) và điều khiển Backstepping là hai phương pháp điều khiển khác nhau và có ưu điểm riêng. Tuy nhiên, kết hợp cả hai phương pháp trong điều khiển mờ Backstepping có thể mang lại chất lượng điều khiển cho AUV tốt hơn. Điều khiển Backstepping có khả năng ổn định hệ thống phi tuyến, trong khi điều khiển mờ giúp giảm thiểu hiện tượng trượt và nhiễu trong quá trình điều khiển. Kết hợp cả hai phương pháp có thể tạo ra một hệ thống điều khiển ổn định và chính xác hơn.

Điều khiển mờ Backstepping ứng dụng cho đối tượng AUV 4 DOF thiếu cơ cấu chấp hành có nhiều ưu điểm, nhưng để đạt được chất lượng điều khiển tối ưu cần có một tập dữ liệu huấn luyện đầy đủ yêu cầu các thông số của bộ điều khiển được cài đặt chính xác. Các phương pháp điều khiển và nâng cao chất lượng luôn là những thách thức đối với các hệ thống phi tuyến bất định kiểu hàm

số. Do đó cách tiếp cận HSMC đã thu hút các nhà nghiên cứu trong nhiều ứng dụng thực tế như hệ thống cơ điện, các máy tự động, robot. Tính ưu việt của bộ điều khiển HSMC là ổn định mặc dù hệ thống có nhiều môi trường và các tham số biến đổi, trong đó nhiều ứng dụng thực tế đã thành công nhờ bộ điều khiển HSMC [31]. Sự kết hợp giữa bộ điều khiển HSMC với kỹ thuật điều khiển khác cũng cho thấy kết quả tốt hơn trong cả nghiên cứu lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm [32], [33]. Phương pháp thiết kế bộ điều khiển HSMC bao gồm các bước: Thiết kế một bề mặt trượt ổn định để điều khiển hệ thống với hiệu suất mong muốn và thiết kế luật điều khiển để đưa quỹ đạo hệ thống về quỹ đạo mặt trượt đã chọn trong thời gian xác định và duy trì chuyển động trượt đó [34]. Khi thiết kế bề mặt trượt cần giải quyết tất cả các hạn chế về các thông số kỹ thuật; vì thế bộ điều khiển cần được thiết kế tối ưu đáp ứng tất cả các yêu cầu. Để nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho AUV trong phần tiếp theo NCS đề xuất bộ điều khiển HSMC và thích nghi Nơ ron HSMC.

### 3.1. Bộ điều khiển trượt tầng (HSMC)

Lý thuyết về bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) đã được trình bày đầy đủ trong tài liệu [62] cho lớp hệ SIMO thiếu cơ cấu chấp hành. Thực chất HSMC là sự kết hợp giữa kỹ thuật Backstepping với điều khiển trượt. Cấu trúc HSMC được trình bày trong hình 3.1 [62].



Hình 3.1. Cấu trúc của bộ điều khiển trượt tầng HSMC [62]

Phương pháp điều khiển với phương pháp HSMC được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(X) + g_1(X)\tau \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(X) + g_2(X)\tau \\ \vdots \\ \dot{x}_{2n-1} = x_{2n} \\ \dot{x}_{2n} = f_n(X) + g_n(X)\tau \end{cases} \quad (3.1)$$

Trong đó  $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{2n}]^T$  là véc-tơ biến trạng thái; các  $f_i$  là hàm phi tuyến bị chặn và các  $g_i$  lớn hơn không và có điểm cân bằng tại gốc tọa độ.

Hệ (3.1) bao gồm  $n$  hệ con và một tín hiệu điều khiển  $\tau$ . Bài toán thiết kế là xác định tín hiệu điều khiển  $\tau$  để đưa các biến trạng thái về gốc tọa độ. Tương tự như kỹ thuật backstepping, HSMC được thiết kế tuần tự bắt đầu từ hệ con thứ nhất cho đến hệ con thứ  $n$ . Ở mỗi bước ta xác định được tín hiệu điều khiển ảo  $\tau_i$  đảm bảo cho hệ phương trình con thứ  $i$  và các hệ con trước đó ổn định theo nghĩa Lyapunov, tín hiệu điều khiển  $\tau$  cần tìm được xác định ở bước cuối cùng theo các bước sau đây:

*Bước 1:* Từ (3.1), suy ra mô hình của hệ con thứ nhất:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + g_1\tau_1 \end{cases} \quad (3.2)$$

Bài toán tổng hợp đặt ra là xác định tín hiệu điều khiển ảo  $\tau_1$  để  $x_1$  quay về gốc tọa độ khi có nhiễu đánh bật khỏi điểm cân bằng.

Để làm được việc này, đầu tiên định nghĩa mặt trượt  $S_1$  [62]):

$$S_1 = c_1 x_1 + x_2 \quad (3.3)$$

Trong đó  $c_1$  là hằng số dương.

Đạo hàm mặt trượt  $s_1$  theo thời gian như sau:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \\ &= c_1 x_2 + f_1 + g_1 \tau_1 \\ &= c_1 x_2 + f_1 + g_1 (\tau_{eq1} + \tau_{sw1}) \\ &= \underbrace{c_1 x_2 + f_1 + g_1 \tau_{eq1}}_{=0} - k_1 s_1 - \eta_1 \operatorname{sgn} s_1 + \underbrace{\eta_1 \operatorname{sgn} s_1 + k_1 s_1 + g_1 \tau_{sw1}}_{=0} \\ &= -k_1 s_1 - \eta_1 \operatorname{sgn} s_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Với  $\tau_1 = \tau_{eq1} + \tau_{sw1}$

Từ hai điều kiện trong (3.4) ta xác định được:

$$\tau_{eq1} = -(c_1 x_2 + f_1) / g_1 \quad (3.5)$$

và:

$$\tau_{sw1} = -\frac{k_1 s_1 + \eta_1 \operatorname{sgn} s_1}{g_1} \quad (3.6)$$

*Bước 2:* Mặt trượt  $S_2$  được thiết kế cho hệ con thứ nhất và hệ con thứ hai dựa trên mặt trượt đã thiết kế cho hệ con thứ nhất.  $S_2$  được định nghĩa như sau:

$$S_2 = \lambda_1 S_1 + \beta_1 s_2 = \lambda_1 s_1 + \beta_1 \underbrace{(c_2 x_3 + x_4)}_{s_2} \quad (3.7)$$

Với:  $S_1 \equiv s_1$  (vì  $s_1$  là mặt trượt của bước thiết kế đầu tiên),  $\lambda_1, \beta_1, c_2$  là các hằng số dương.

Như bước trên tín hiệu điều khiển ảo được xác định  $\tau_2$  để đưa mặt trượt  $S_2 \rightarrow 0$ . Do vậy ta định nghĩa hàm Lyapunov cho bước hai như sau:

$$V(S_2) = \frac{1}{2} S_2^2 \quad (3.8)$$

Đạo hàm theo thời gian của (3.7) ta có:

$$\dot{V}(S_2) = S_2 \dot{S}_2 = S_2 (\lambda_1 \dot{S}_1 + \beta_1 \dot{s}_2) \quad (3.9)$$

Từ (3.8) và (3.9) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= \lambda_1 \dot{S}_1 + \beta_1 \dot{s}_2 \\ &= \lambda_1 (c_1 x_2 + f_1 + g_1 \tau_2) + \beta_1 (c_2 x_4 + f_2 + g_2 \tau_2) \\ &= \lambda_1 (c_1 x_2 + f_1 + g_1 (\tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2})) + \\ &\quad \beta_1 (c_2 x_4 + f_2 + g_2 (\tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2})) \\ &= \beta_1 \underbrace{(c_2 x_4 + f_2 + g_2 \tau_{eq2})}_{=0} + \tau_{sw2} (\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) + \\ &\quad (\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) \tau_{sw1} + \lambda_1 \underbrace{(c_1 x_2 + f_1 + g_1 \tau_{eq1})}_{=0} + \lambda_1 g_1 \tau_{eq2} + \beta_1 g_2 \tau_{eq1} \\ &= \underbrace{\tau_{sw2} (\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) + (\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2) \tau_{sw1} + \lambda_1 g_1 \tau_{eq2} + \beta_1 g_2 \tau_{eq1}}_{=0} + k_2 S_2 + \eta_2 \operatorname{sgn} S_2 - \\ &\quad (k_2 S_2 + \eta_2 \operatorname{sgn} S_2) \\ &= -k_2 S_2 - \eta_2 \operatorname{sgn} S_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Thay (3.10) vào (3.9) được kết quả:

$$\dot{V}(S_2) = -k_2 S_2^2 - \eta_2 S_2 \operatorname{sgn} S_2 \quad (3.11)$$

Từ các điều kiện trong (3.5), (3.6) ta xác định được  $\tau_{eq2}$  và  $\tau_{sw2}$ :

$$\tau_{eq2} = -(c_2 x_4 + f_2) / g_2 \quad (3.12)$$

và:

$$\tau_{sw2} = -\tau_{sw1} - \frac{\lambda_1 g_1 \tau_{eq2} + \beta_1 g_2 \tau_{eq1}}{\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2} - \frac{k_2 S_2 + \eta_2 \operatorname{sgn} S_2}{\lambda_1 g_1 + \beta_1 g_2} \quad (3.12)$$

...

*Bước i:* Mặt trượt  $S_i$  được thiết kế dựa trên mặt trượt  $S_{i-1}$  và hệ con thứ  $i$  như sau:

$$S_i = \lambda_{i-1} S_{i-1} + \beta_{i-1} \dot{S}_i = \lambda_1 S_{i-1} + \beta_{i-1} \underbrace{(c_i x_{2i-1} + x_{2i})}_{S_i} \quad (3.13)$$

Với:  $\lambda_{i-1}, \beta_{i-1}, c_i$  là các hằng số dương.

Như bước trên xác định tín hiệu điều khiển ảo  $\tau_i$  để đưa mặt trượt  $S_i \rightarrow 0$ .

Do vậy định nghĩa hàm Lyapunov cho bước hai như sau:

$$V_i(S_i) = \frac{1}{2} S_i^2 \quad (3.14)$$

Đạo hàm theo thời gian của (2.56):

$$\dot{V}_i(S_i) = S_i \dot{S}_i = S_i (\lambda_{i-1} \dot{S}_{i-1} + \beta_{i-1} \dot{S}_i) \quad (3.15)$$

Từ phương trình (3.15) suy ra:

$$S_i = \sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} \cdot S_r \quad (3.16)$$

Do đó, phương trình (3.16) được viết lại:

$$\dot{V}_i = S_i \dot{S}_i = S_i \left[ \sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} \cdot \dot{S}_r \right] \quad (3.17)$$

Từ (3.15), (3.17) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i \dot{S}_i = S_i \left\{ \sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} (c_r x_{2r} + f_r + g_r \tau_i) \right\} \\ &= S_i \left\{ \sum_{r=1}^i \left[ \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} g_r \cdot \left( \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq r}}^i \tau_{eq l} + \sum_{l=1}^i \tau_{sw l} \right) \right] \right\} \\ &= S_i \left\{ \sum_{l=1}^i \left[ \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \cdot \tau_{eq l} + \sum_{l=1}^i \left[ \sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \tau_{sw l} \right\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Tương tự như bước 2, tín hiệu điều khiển được xác định  $\tau_{eqi}$  và  $\tau_{swi}$  như sau:

$$\tau_{eqi} = -(c_i x_{2i} + f_i) / g_i \quad (3.19)$$

$$\tau_{swi} = -\sum_{l=1}^{i-1} \tau_{swl} - \frac{\sum_{l=1}^i \left[ \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \tau_{eql}}{\sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} - \frac{k_i S_i + \eta_i \operatorname{sgn}(S_i)}{\sum_{r=1}^i \left( \prod_{j=r}^i \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} \quad (3.20)$$

...

*Bước n:*

Tiến hành tương tự như bước i, ta có mặt trượt sau:

$$S_n = \lambda_{n-1} S_{n-1} + \beta_{n-1} s_n \quad (3.21)$$

Ở bước cuối ta xác định tín hiệu điều khiển  $\tau_n$  cũng chính là tín hiệu  $\tau$  cần tìm cho hệ (3.21). Tín hiệu điều khiển được xác định thông qua điều kiện tồn tại của hàm điều khiển Lyapunov sau:

$$V_n = \frac{1}{2} S^T S \quad (3.22)$$

Đạo hàm hàm điều khiển Lyapunov theo thời gian suy ra:

$$\dot{V}_n = S_n \dot{S}_n = S_n (\lambda_{n-1} \dot{S}_{n-1} + \beta_{n-1} \dot{s}_n) \quad (3.23)$$

Từ (3.21) suy ra:

$$\dot{S}_n = \sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} \cdot \dot{s}_r \quad (3.24)$$

Do đó, (3.23) được viết lại:

$$\dot{V}_n = S_n \dot{S}_n = S_n \left[ \sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} \cdot \dot{s}_r \right] \quad (3.25)$$

Từ (3.23) và (3.24) (3.25) trở thành:

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= S_n \dot{S}_n \\ &= S_n \left\{ \sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} (c_r x_{2r} + f_r + g_r \tau_n) \right\} \\ &= S_n \left\{ \sum_{r=1}^n \left[ \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \cdot \beta_{r-1} g_r \cdot \left( \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq r}}^n \tau_{eql} + \sum_{l=1}^n \tau_{swl} \right) \right] \right\} \\ &= S_n \left\{ \sum_{l=1}^n \left[ \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq l}}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \cdot \tau_{eql} + \sum_{l=1}^n \left[ \sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \tau_{swl} \right\} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Tín hiệu điều khiển  $\tau_{eqn}$  và  $\tau_{swn}$  được xác định bằng các phép biến đổi tương tự như bước i:

$$\tau_{eqn} = -(c_n x_{2n} + f_n) / g_n \quad (3.27)$$

$$\tau_{swn} = -\sum_{l=1}^{n-1} u_{swl} - \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \right] \tau_{eql}}{\sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} - \frac{k_n S_n + \eta_n \operatorname{sgn}(S_n)}{\sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} \quad (3.28)$$

Ở các bước vào biểu thức (3.27) và (3.28) ta dùng phương pháp thay thế tín hiệu ở điều khiển suy ra luật điều khiển trượt tầng:

$$\begin{aligned} \tau = \tau_n &= \sum_{l=1}^{n-1} \tau_{swl} + \tau_{swn} + \sum_{l=1}^n \tau_{eql} \\ &= \frac{\sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r \tau_{eqr}}{\sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} - \frac{k_n S_n + \eta_n \operatorname{sgn}(S_n)}{\sum_{r=1}^n \left( \prod_{j=r}^n \lambda_j \right) \beta_{r-1} g_r} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Một cách tiếp cận khác của thuật toán điều khiển trượt với hệ thiếu cơ cấu chấp hành như AUV được đề xuất là điều khiển theo cấu trúc phân tầng nhiều lớp (hay gọi là điều khiển trượt tầng). Cấu trúc của bộ điều khiển trượt tầng cho các lớp mô hình đối tượng thiếu chấp hành đã được trình bày và giới thiệu chi tiết ở công trình [63]. Trong phương pháp trượt tầng, hệ thống được phân chia thành các hệ con theo cấu trúc vật lý của đối tượng, sau đó định nghĩa cho các mặt trượt hệ con, mặt trượt chung được định nghĩa là tổ hợp tuyến tính của các mặt trượt con và được sử dụng để thiết kế luật điều khiển [64]. Nhiều tác giả cũng đã chỉ ra các biến trạng thái sẽ ổn định tiệm cận nếu giả thiết một mặt trượt con bị chặn được thỏa mãn. Mặt trượt của hệ con thứ nhất được chọn làm mặt trượt lớp thứ nhất, tiếp đó mặt trượt này cùng mặt trượt của hệ con khác được sử dụng để thiết kế cho mặt trượt lớp thứ hai. Quá trình tiếp tục đến khi tất cả mặt trượt của các hệ con được tổng hợp. Phương pháp trên rất phù hợp cho đối tượng thiếu cơ cấu chấp hành như AUV, và cũng giống như phương pháp điều khiển trượt thông thường, bộ điều khiển trượt tầng có khả năng bền vững với nhiễu đầu vào. HSMC là một giải pháp tốt cho các hệ phi tuyến nhưng nó có thể

gây ra sự dao động với tần số cao làm ảnh hưởng đến các thiết bị truyền động, năng lượng bị lãng phí và tạo ra các dao động trên cánh lái của AUV dẫn đến sự mất ổn định.

Từ đó, cách tiếp cận HSMC đã thu hút nhiều nhà nghiên cứu thực hiện các ứng dụng thực tế như hệ thống cơ điện, các máy tự động, robot. Gần đây, sự kết hợp giữa bộ điều khiển HSMC với kỹ thuật điều khiển khác cũng cho thấy kết quả tốt hơn trong cả nghiên cứu lý thuyết và nghiên cứu thực nghiệm [65]. Phương pháp thiết kế bộ điều khiển HSMC cho AUV hướng tới: Thiết kế một bề mặt trượt ổn định để điều khiển hệ thống với chất lượng điều khiển bám quỹ đạo mong muốn và thiết kế luật điều khiển để đưa quỹ đạo hệ thống về quỹ đạo mặt trượt đã chọn trong thời gian hữu hạn và duy trì chuyển động trượt đó [66], [67], [68].

### **3.2. Mạng nơ-ron nhân tạo**

Mạng Nơ – ron nhân tạo được đưa ra bởi Warren McCulloch và Walter Pitts vào năm 1943 với mô hình toán học mô phỏng hoạt động của não bộ con người, từ đó tạo thành khả năng thực hiện nhiều nhiệm vụ phức tạp trong môi trường không xác định của hệ thống. Từ giữa những năm 1980, điều khiển hệ thống động học phi tuyến không xác định sử dụng nơ-ron đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học [75]. Mạng nơ-ron có nhiều đặc điểm đáp ứng được với những yêu cầu ngày càng cao về điều khiển phức tạp, tính bất định cao, hệ thống phi tuyến trong những ứng dụng công nghiệp. Mạng nơ-ron có cấu trúc song song, có khả năng học, xấp xỉ hàm phi tuyến, khử sai số, và thực hiện tích hợp hiệu quả cho những ứng dụng thời gian thực. Mạng nơ-ron thường được sử dụng theo nguyên tắc không cần phải sử dụng nhiều công sức vào việc mô hình hóa đối tượng, trong những trường hợp việc mô hình hóa là rất khó khăn [75].

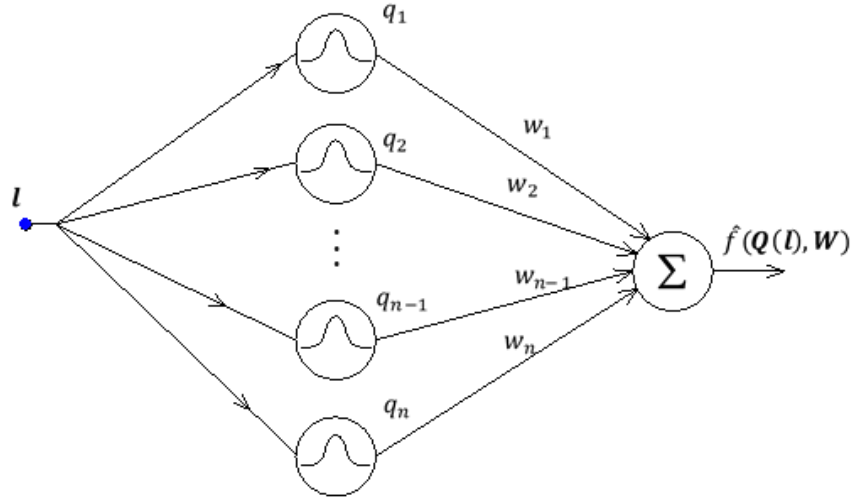
Trong điều khiển nơ-ron của hệ thống phi tuyến, động học hệ thống phi tuyến chưa biết được xấp xỉ bằng cách tuyến tính hóa hoặc bằng mạng nơ-ron, như mạng nơ-ron hàm cơ sở hướng tâm (RBF) và mạng nơ-ron nhiều lớp (MNNs) [76]. Trong các bước điều khiển nơ-ron trước đây có hai xu hướng huấn luyện mạng nơ-ron thường được sử dụng là huấn luyện mạng nơ-ron online và huấn luyện mạng nơ-ron offline. Trong huấn luyện mạng nơ-ron

offline kỹ thuật tối ưu được sử dụng chính để thu được luật thích nghi thông số nên tồn tại một số nhược điểm như thời gian cập nhật lâu không đáp ứng được tính năng thực của hệ thống, tiêu tốn tài nguyên tính toán nên phương pháp này quá cũ và không phù hợp với AUV cần tính năng thời gian thực [75]. Phương pháp huấn luyện mạng nơ-ron online được cập nhật liên tục mỗi khi có dữ liệu được nhận vào với rất nhiều những ưu điểm để điều khiển AUV như thời gian tính toán nhanh (đảm bảo được tính năng thời gian thực của hệ thống), có tính ổn định được đảm bảo thông qua hàm Lyapunov giúp hệ thống có khả năng thích nghi với sai lệch mô hình [77]. Trong luận án này NCS lựa chọn phương pháp huấn luyện mạng online để điều khiển thích nghi bền vững cho AUV.

Đặc điểm của điều khiển nơ-ron thích nghi được đề xuất dựa trên kỹ thuật điều khiển thích nghi bền vững bao gồm: (i) thiết kế và phân tích dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov; (ii) sự ổn định và đặc tính của hệ thống điều khiển vòng kín được xác định một cách rõ ràng; (iii) trọng số của mạng nơ-ron được huấn luyện trực tuyến dựa trên hàm Lyapunov của hệ kín, không sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa như những phương pháp huấn luyện trước kia. Phương pháp điều khiển nơ-ron thích nghi này phù hợp với hệ thống phi tuyến phức tạp, bất định và đã có những bước tiến bộ vượt bậc trong lĩnh vực điều khiển phi tuyến.

Chính vì vậy, để thực hiện xấp xỉ những thành phần bất định không biết trước trong mô hình động lực học AUV, luận án sử dụng mạng nơ-ron RBF để tận dụng những ưu điểm như sau:

- i) Mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ hàm không biết trước và được sử dụng rộng rãi trong nhận dạng và điều khiển thích nghi;
- ii) Mạng nơ-ron RBF có thể được biểu diễn theo mẫu hồi quy tham số tuyến tính, là tích của véc-tơ trọng số nơ-ron và véc-tơ hồi quy. Trong đó, thành phần của véc-tơ hồi quy là những hàm phi tuyến đầu vào của mạng RBF;
- iii) Mạng nơ-ron RBF với tín hiệu vào là những hàm có chu kỳ thì có véc-tơ hồi quy thỏa mãn điều kiện kích thích bền PE. Với điều kiện PE là điều kiện quan trọng để hội tụ thông số và nhận dạng chính xác động học hệ thống trong lý thuyết nhận dạng hệ thống và điều khiển thích nghi. Cấu trúc mạng nơ-ron được biểu diễn ở hình:



Hình 3.2. Xấp xỉ hàm bất định bằng mạng RBF

Mạng RBF (Hình 3.2) là mạng 2 lớp MIMO. Lớp vào gồm các nơ-ron hướng tâm, đầu ra phụ thuộc vào véc-tơ tín hiệu đầu vào được tính bằng công thức:

$$q_i(l) = \exp \left[ \frac{-(l - \mu_i)^T (l - \mu_i)}{\xi_i^2} \right], i = 1, 2, \dots, n \quad (3.30)$$

Trong đó:  $\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{im}]^T$  là trọng tâm của hàm hướng tâm và  $\xi_i$  là độ tản. Véc-tơ đầu ra của lớp vào được biểu diễn bằng  $Q(l) = [q_1(l), \dots, q_n(l)]^T$ .

Hàm đầu ra của mạng được xác định như sau [46]:

$$f(l) = \sum_{i=1}^n w_i q_i(l) = W^T Q(l) \quad (3.31)$$

Trong đó  $l \in \Omega_l \subset R^m$  là véc-tơ đầu vào,  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \in R^n$  là véc-tơ trọng số.

Mạng nơ-ron có khả năng xấp xỉ một hàm phi tuyến bất kỳ với độ chính xác tùy ý. Điều đó có nghĩa là, đối với hàm liên tục trơn bất kỳ  $f(l): \Omega_l \rightarrow R$ , trong đó  $\Omega_l \subset R^m$  là một tập compact, hàm  $f(l)$  được xấp xỉ bằng mạng nơ-ron (3.31) (với số nơ-ron lớp vào  $n$  là đủ lớn), luôn tồn tại một véc-tơ trọng số  $W^*$  sao cho ứng với mỗi  $\epsilon^* > 0$  nhỏ tùy ý, ta có:

$$\max_{l \in \Omega_l} |f(l) - W^{*T} Q(l)| < \epsilon^* \quad (3.32)$$

Hay

$$f(l) = W^{*T}Q(l) + \varepsilon(l), \forall l \in \Omega_l \quad (3.33)$$

Trong đó  $|\varepsilon(l)| > \varepsilon^*$ . Tài liệu [54] chỉ ra rằng mạng RBF  $W^TQ(l)$ , với một số lượng nơ-ron RBF đủ lớn có thể xấp xỉ đồng dạng một hàm trơn  $f(l): \Omega_l \rightarrow R$  với sai số  $\varepsilon^*$  nhỏ bao nhiêu tùy ý.

Kết hợp phương trình (3.32) và (3.33), ta có:

$$\Delta f = f(l) - \hat{f}(l) = W^TQ(l) - \varepsilon, \quad (3.34)$$

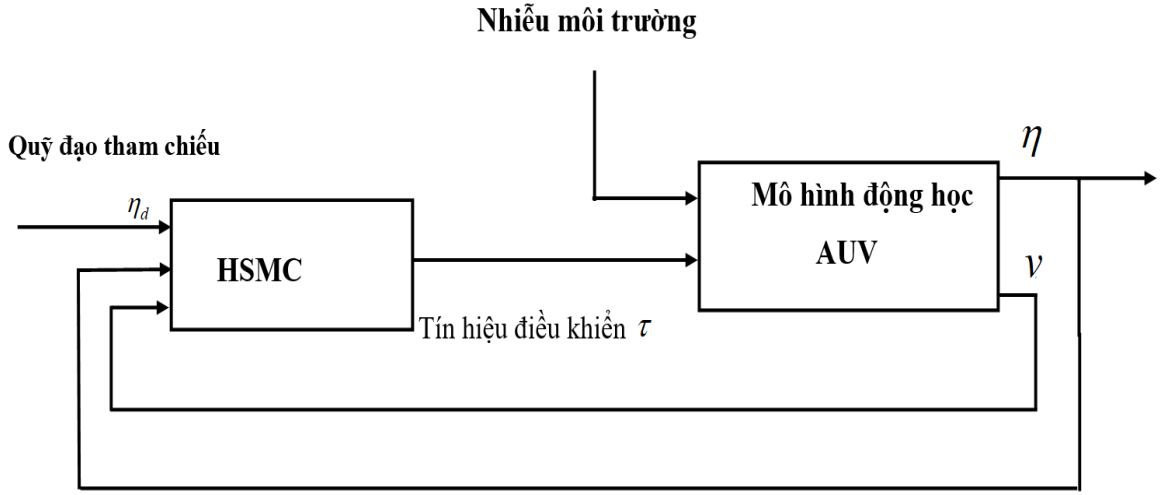
Trong đó  $U = W - W^*$ ,  $W$  là ước lượng của  $W^*$

Những nghiên cứu sử dụng các phương tiện của phòng thí nghiệm như hệ thống kéo, hệ thống tạo sóng, hệ thống đo v.v. để tính toán, đo được một số các thông số của ma trận  $C(v), D(v)$ . Tuy nhiên khi ở môi trường đại dương việc tách các thông số xác định và bất định là rất khó khăn, do thông số chưa biết và nhiễu từ môi trường đại dương được đưa về dạng véc-tơ hằng chứ không phải biến đổi theo thời gian ở dạng hàm. Chính vì thế các phương pháp điều khiển Nơ ron hướng tâm đang có vai trò rất lớn trong việc xây dựng các thuật toán điều khiển thông minh. Trong đó có kết hợp với điều khiển phi tuyến để nâng cao chất lượng điều khiển cho mô hình. Nội dung này chính là trọng tâm của luận án sau khi đã có kết quả đánh giá của các bộ điều khiển phía trước, từ điều khiển Backstepping đến điều khiển mờ Backstepping, điều khiển trượt tầng HSMC.

### 3.3. Thiết kế bộ điều khiển HSMC cho thiết bị lặn tự hành AUV

#### 3.3.1. Tổng hợp bộ điều khiển trượt tầng HSMC cho AUV 4 DOF

Cấu trúc bộ điều khiển trượt tầng bao gồm các tín hiệu đầu vào  $\eta_d = [x, y, z, \psi]^T$  là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục  $Ox, Oy, Oz$  và góc điều hướng tàu quay quanh trục  $z$ . Vận tốc dài  $v = [u, v, w, r]^T$  gửi tín hiệu về bộ điều khiển HSMC để so sánh với tín hiệu đặt và đưa ra tín hiệu điều khiển trực tiếp  $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_w, \tau_r]^T$  đến đối tượng AUV như hình 3.3



Hình 3.3. Cấu trúc hệ thống điều khiển HSMC cho AUV

Thuật toán điều khiển trượt tầng HSMC được trình bày như sau:

Từ hệ phương trình (2.23), ta viết lại dưới dạng tổng quát hóa như sau:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}v_1 \\ \dot{v}_1 = f_1(X) + g_1(X)\tau \\ \dot{\eta}_2 = J_{22}v_2 \\ \dot{v}_2 = f_2(X) + g_2(X)\tau \end{cases} \quad (3.35)$$

Với:

$$\begin{aligned} X &= [\eta_1 \quad v_1 \quad \eta_2 \quad v_2]^T \\ f_1(X) &= \bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) \\ g_1(X) &= \bar{M}^{-1} \\ f_2(X) &= -M^{-1}_{22} [M_{21}\bar{M}^{-1}(-\bar{C}_1v_1 - \bar{C}_2v_2) + (C_{21} + D_{21})v_1 + (C_{22} + D_{22})v_2] \\ g_2(X) &= -M^{-1}_{22}M_{21}\bar{M}^{-1} \end{aligned}$$

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

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 - \eta_{1d} \\ v_1 \\ \eta_2 - \eta_{2d} \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Định nghĩa mặt trượt

$$\begin{cases} s_1 = k_1e_1 + e_2 (k_1 > 0) \\ s_2 = k_2e_3 + e_4 (k_2 > 0) \\ S = \lambda s_1 + \beta s_2 (\lambda, \beta > 0) \end{cases} \quad (3.37)$$

Theo phương pháp điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) cho hệ thiếu cơ cấu chấp hành, tín hiệu của bộ điều khiển được chia làm hai thành phần:

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{sw} \quad (3.38)$$

Với:

+  $\tau_{eq}$  là tín hiệu dùng để điều khiển hệ con trong cấu trúc bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller.

+  $\tau_{sw}$  là tín hiệu dùng để điều khiển chuyển mạch của lớp mặt trượt hệ thống.

Để đảm bảo tính ổn định cho hệ thống thiết bị lặn tự hành AUV, xét hàm Lyapunov cho hệ kín có dạng như sau:

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (3.39)$$

Đạo hàm V theo thời gian:

$$\frac{dV}{dt} = S \cdot \dot{S} \quad (3.40)$$

Từ (3.35), (3.36), (3.37) và (3.40) ta có phương trình sau:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= S \cdot \dot{S} = S \cdot [\lambda \dot{s}_1 + \beta \dot{s}_2] \\ &= S \cdot [\lambda(k_1 J_{11} v_1 + f_1 + g_1 \tau_2 - k_1 \dot{x}_{1d}) + \beta(k_2 J_{22} v_2 + f_2 + g_2 \tau_2 - k_2 \dot{x}_{3d})] \end{aligned}$$

Vì  $x_{1d}, x_{3d}$  là các giá trị hằng số nên  $\dot{x}_{1d} = \dot{x}_{3d} = 0$ . Suy ra:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= S \cdot \dot{S} = S \cdot [\lambda(k_1 J_{11} v_1 + f_1 + g_1 \tau_2) + \beta(k_2 J_{22} v_2 + f_2 + g_2 \tau_2)] \\ &= S \cdot \begin{bmatrix} \lambda(k_1 J_{11} v_1 + f_1 + g_1(\tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2})) \\ + \beta(k_2 J_{22} v_2 + f_2 + g_2(\tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2})) \end{bmatrix} \\ &= S \cdot \begin{bmatrix} \lambda(k_1 J_{11} v_1 + f_1 + g_1 \tau_{eq1}) + \beta(k_2 J_{22} v_2 + f_2 + g_2 \tau_{eq2}) \\ + \tau_{sw1}(\lambda g_1 + \beta g_2) + \tau_{sw2}(\lambda g_1 + \beta g_2) \\ + \lambda g_1 \tau_{eq2} + \beta g_2 \tau_{eq1} + k \cdot S + \delta \operatorname{sgn}(S) - (k \cdot S + \delta \operatorname{sgn}(S)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Để đảm bảo tính ổn định của hệ thống thông qua nguyên lý ổn định Lyapunov sao cho  $\frac{dV}{dt}$  xác định âm, ta chọn các tín hiệu điều khiển như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{eq1} = \frac{-(k_1 J_{11} v_1 + f_1)}{g_1} \\ \tau_{eq1} = \frac{-(k_2 J_{22} v_2 + f_2)}{g_2} \\ \tau_{sw2} = -\tau_{sw1} - \frac{\lambda g_1 \tau_{eq2} + \beta g_2 \tau_{eq1}}{\lambda g_1 + \beta g_2} - \frac{k.S + \delta \operatorname{sgn}(S)}{\lambda g_1 + \beta g_2} \end{array} \right. \quad (3.42)$$

Thay (3.42) vào phương trình (3.41) ta có :

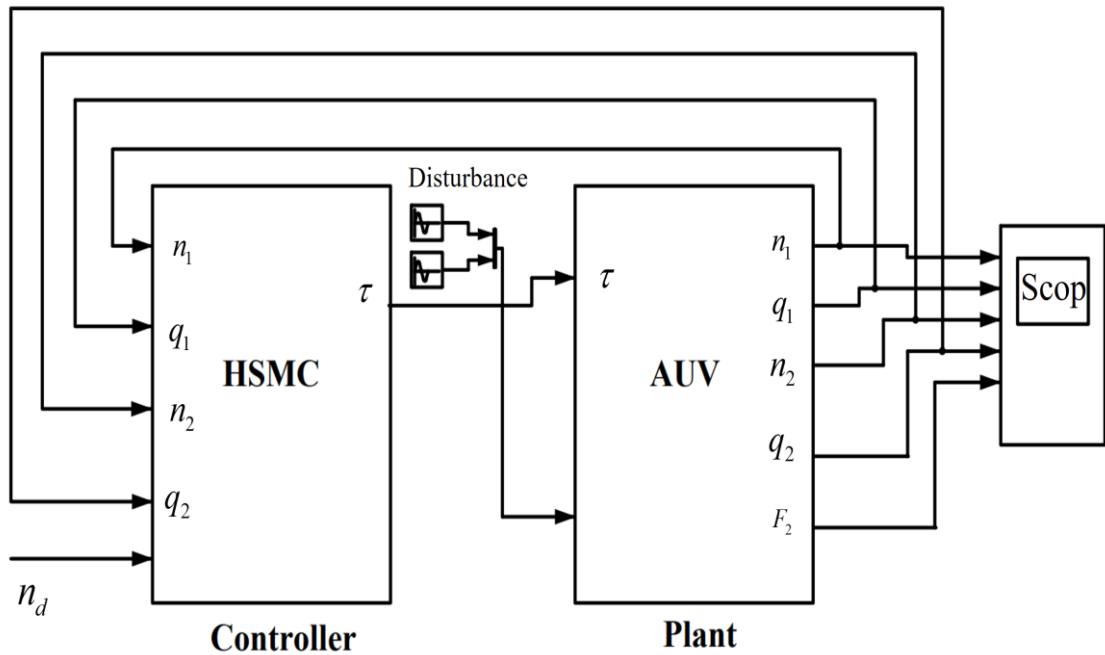
$$\frac{dV}{dt} = S.S^T = -S^T (k.S + \delta \operatorname{sgn}(S)) < 0 \text{ thỏa mãn nguyên lý ổn định Lyapunov.}$$

Tín hiệu điều khiển xác định theo công thức sau:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2} \\ &= -\frac{\lambda f_1 + \beta f_2 + \lambda k_1 J_{11} v_1 + \beta k_2 J_{22} v_2 + k.S + \delta \operatorname{sgn}(S)}{\lambda g_1 + \beta g_2} \end{aligned} \quad (3.43)$$

### 3.3.2. Mô hình mô phỏng AUV 4 DOF điều khiển trượt tầng HSMC

Sơ đồ khối mô phỏng hệ thống điều khiển trượt tầng HSMC cho đối tượng AUV hệ thiếu cơ cấu chấp hành trên matlab simulink bao gồm khối tín hiệu đầu vào, tín hiệu đặt  $\eta_d$ , khối điều khiển HSMC và mô hình đối tượng điều khiển AUV (có nhiễu tác động), khối lấy tín hiệu đầu ra (Scop) như hình 3.4.



Hình 3.4. Sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt tầng HSMC trên Matlab simulink

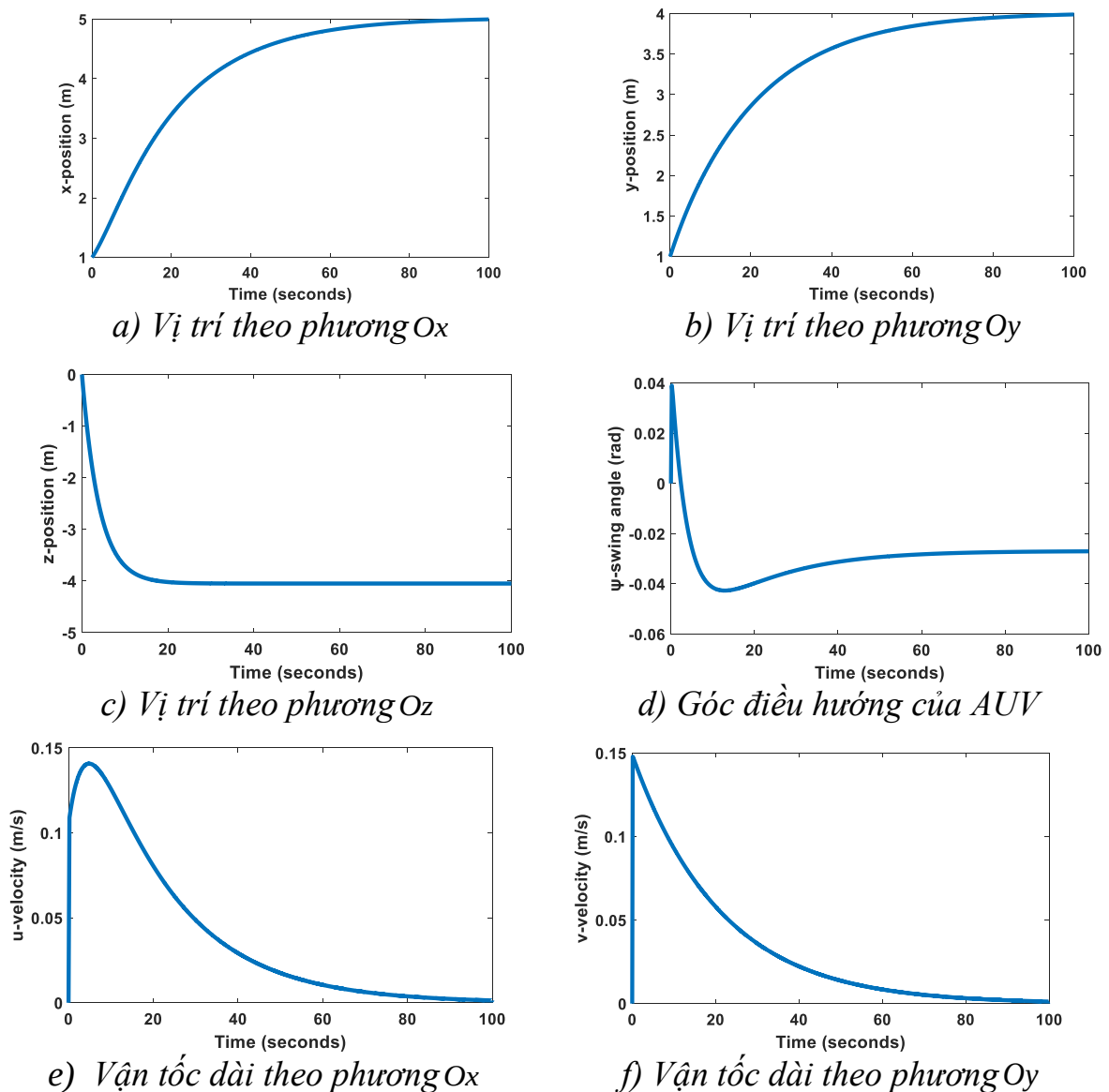
Để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC), mô phỏng đã thực hiện cho đối tượng thiết bị lặn tự hành AUV với các bộ tham số sau:

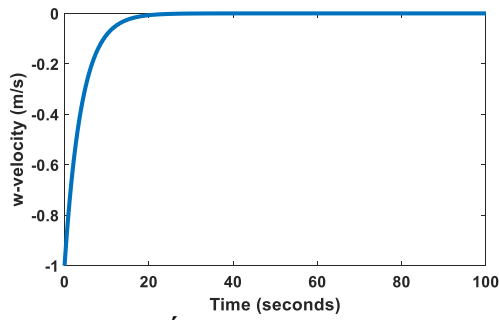
**Tham số mô hình thiết bị AUV [17] như bảng 2.2**

**Bảng 3.1: Tham số bộ điều khiển HSMC**

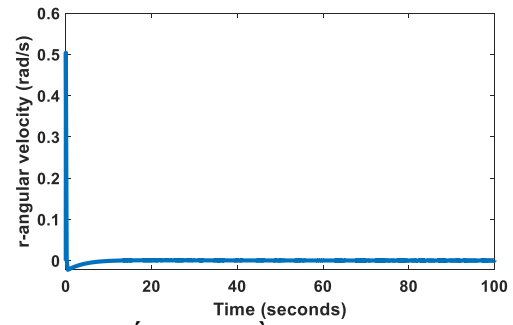
| Tham số  | Giá trị | Tham số     | Giá trị      |
|----------|---------|-------------|--------------|
| $k$      | 100     | $\lambda$   | 500          |
| $\delta$ | 5       | $\beta$     | 2.5          |
| $k_1$    | 0.05    | $\eta_{1d}$ | $[5 \ 4]^T$  |
| $k_2$    | 5       | $\eta_{2d}$ | $[-4 \ 0]^T$ |

Kết quả mô phỏng cho đối tượng thiết bị lặn AUV với bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) như hình 3.5 như sau:





g) Vận tốc dài theo phương Oz



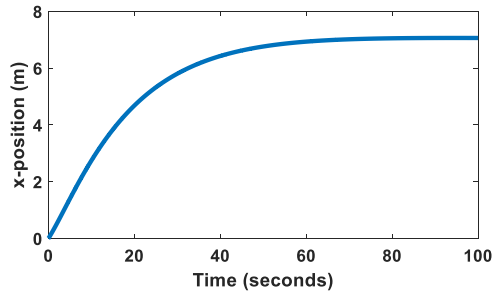
h) Vận tốc góc điều hướng của AUV

Hình 3.5. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng HSMC

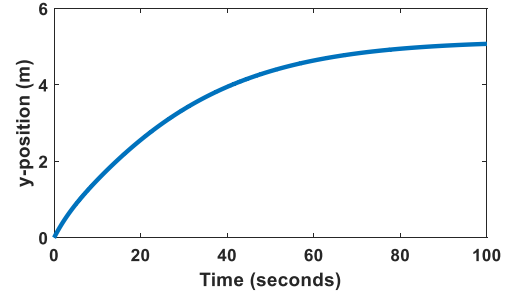
Từ kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) áp dụng đối với đối tượng mới thiết bị lặn AUV cho chất lượng điều khiển tốt về các vị trí bám, góc điều hướng, vận tốc dài và vận tốc góc trong không gian 3 chiều. Cụ thể thời gian xác lập của hệ thống về độ bám vị trí theo phương  $Ox$ ,  $Oy$  lần lượt là 84s, 86s; còn thời gian xác lập của vị trí theo phương  $Oz$  và góc điều hướng lần lượt là 40s. Tương tự, các đại lượng vận tốc dài theo các phương  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  và vận tốc góc điều hướng có thời gian xác lập khá lớn. Tuy nhiên, độ quá độ điều chỉnh hệ thống thiết bị lặn AUV gần như bằng không hoặc nhỏ hơn 5% so với giá trị đặt mong muốn có thể bỏ qua được đối với các giá trị véc tơ về vị trí, tốc độ theo các phương trong không gian 3 chiều và góc điều hướng, vận tốc góc điều hướng của hệ thống thiết bị lặn AUV. Tóm lại xét trên phương diện chất lượng điều khiển cơ khí cũng như chất lượng điều khiển đối với đối tượng mô hình thực trong phòng thí nghiệm thì bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) cho chất lượng tốt so với bài toán điều khiển mô hình thiết bị lặn AUV mới của luận án.

Để chắc chắn hơn về chất lượng của bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC), luận án đã thử nghiệm nhiều thông số đặt khác cho đối tượng mô hình AUV như sau:

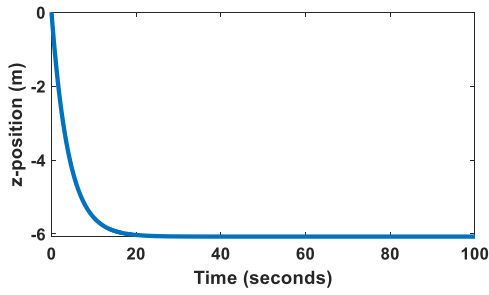
1. Trường hợp 1: Vị trí đặt theo phương x là : 7 (m), vị trí đặt theo phương y là : 5 (m), vị trí đặt theo phương z là : -6 (m), giá trị đặt góc điều hướng : -0.25 (rad)



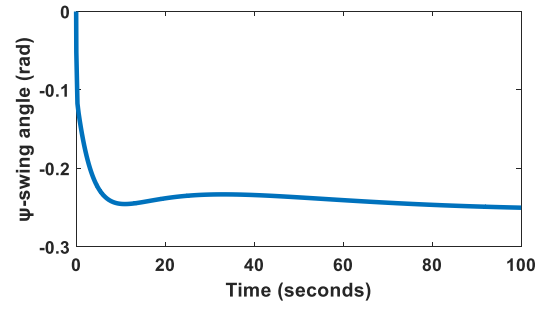
a) Vị trí theo phương Ox



b) Vị trí theo phương Oy



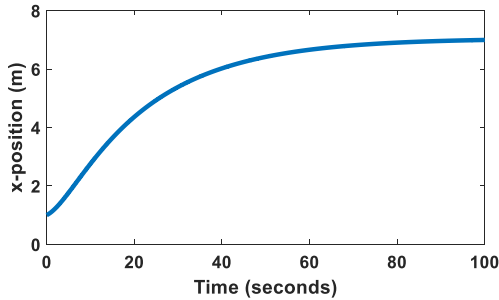
c) Vị trí theo phương Oz



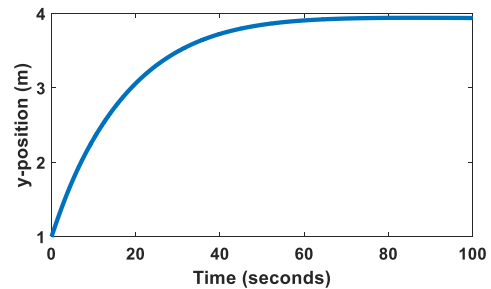
d) Góc điều hướng của AUV

Hình 3.6. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trong trường hợp 1

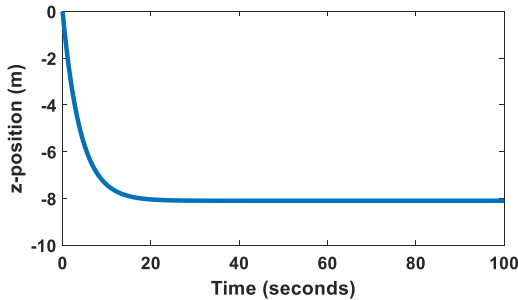
2. Trường hợp 2: Vị trí đặt theo phương x là : 7 (m), vị trí đặt theo phương y là : 4 (m), vị trí đặt theo phương z là : -8 (m), giá trị đặt góc điều hướng: 0.15 (rad)



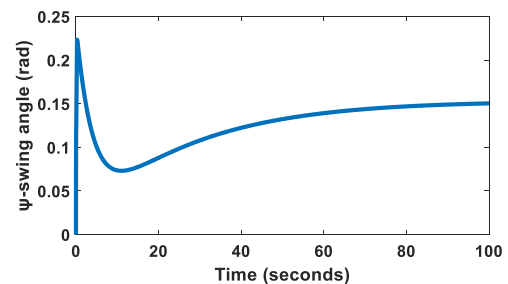
a) Vị trí theo phương Ox



b) Vị trí theo phương Oy



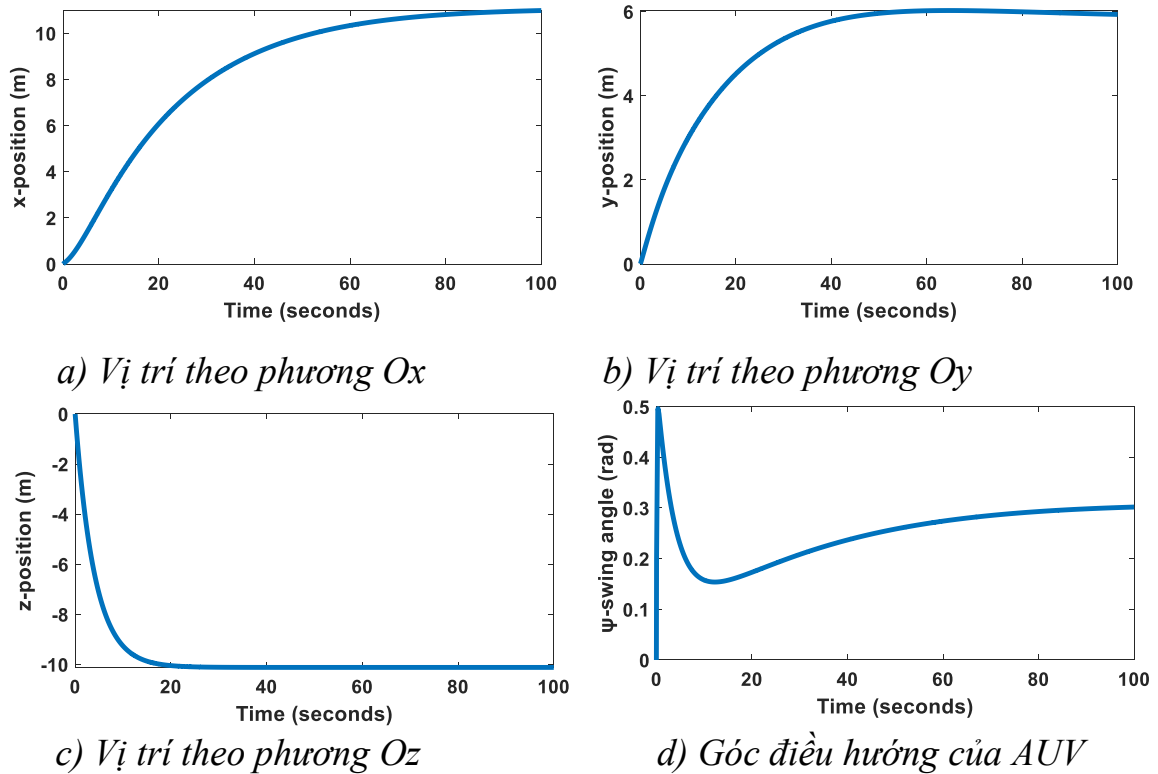
c) Vị trí theo phương Oz



d) Góc điều hướng của AUV

Hình 3.7. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 2 HSMC

3. Trường hợp 3: Vị trí đặt theo phương x là: 11 (m), vị trí đặt theo phương y là: 6 (m), vị trí đặt theo phương z là : -10 (m), giá trị đặt góc điều hướng: 0.3 (rad)



Hình 3.8. Vị trí, độ sâu và góc điều hướng trường hợp 3 HSMC

Kết quả mô phỏng và các thông số động lực học của mô hình đối tượng lặn tự hành AUV đều cho chất lượng điều khiển tốt. Mặc dù thời gian xác lập trong cả ba trường hợp hơi lớn và có hiện tượng dao động khi chuyển mạch xung quanh mặt trượt hệ thống nhưng bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) đều cho các giá trị mô phỏng bám sát với giá trị đặt mong muốn và gần như độ quá điều chỉnh rất nhỏ và chấp nhận được. Kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB đã minh chứng được rằng: Với giải thuật này, đáp ứng hệ thống thiết bị lặn tự hành AUV bám theo tín hiệu mong muốn với độ quá điều chỉnh nhỏ hơn 5%, sai số xác lập bằng không và thời gian xác lập bám vị trí theo phương Ox, Oy lần lượt là 84s, 86s; còn thời gian xác lập của vị trí theo phương Oz và góc điều hướng là khoảng 40s. Bộ điều khiển Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) được xây dựng cho chất lượng tốt so với yêu cầu bài toán điều khiển mô hình thiết bị lặn AUV 4 DOF thiếu cơ cấu

chấp hành. Trong nghiên cứu tiếp theo NCS 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.

### **3.4. Bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) thích nghi Nơ ron cho AUV**

Hạn chế chính của HSMC là hiện tượng dao động tần số cao, do chức năng chuyển mạch không liên tục khiến tín hiệu điều khiển dao động xung quanh bề mặt trượt. Một yếu tố khác góp phần vào sự dao động hệ thống là việc sử dụng bộ điều khiển kỹ thuật số với tỷ lệ lấy mẫu hữu hạn [31]. Hiện tượng rung (dao động với tần số cao) là có hại vì nó có thể làm ảnh hưởng đến độ ổn định và độ bền của hệ thống cơ khí, độ mòn của các cơ cấu chuyển động cơ học và năng lượng tổn thất trong hệ thống. Để khắc phục nhược điểm đó rất nhiều bộ điều khiển hiện đại được nghiên cứu, bộ điều khiển thích nghi được trình bày trong các nghiên cứu [36], bộ điều khiển logic mờ cũng đã được nghiên cứu trong FLC [37], bộ điều khiển dự báo MPC [38].

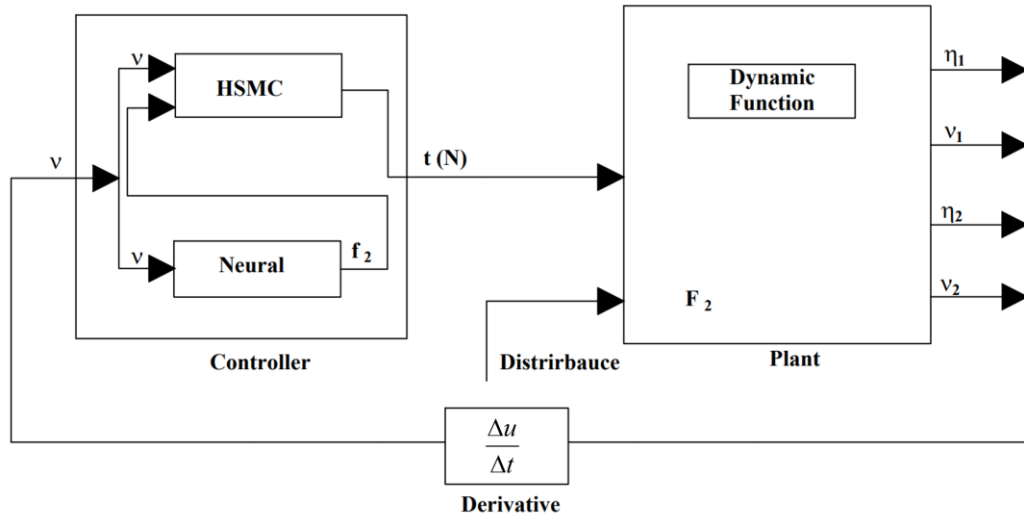
Điều khiển nơ-ron bắt nguồn từ khả năng học và điều khiển của con người, từ đó tạo thành khả năng thực hiện nhiều nhiệm vụ phức tạp trong môi trường không xác định của hệ thống. Từ giữa những năm 1980, điều khiển hệ thống động học phi tuyến không xác định sử dụng nơ-ron đã thu hút sự quan tâm của cộng đồng điều khiển. Mạng nơ-ron có nhiều đặc điểm đáp ứng được với những yêu cầu ngày càng cao về điều khiển phức tạp, tính bất định cao, hệ thống phi tuyến trong những ứng dụng công nghiệp. Mạng nơ-ron thường được sử dụng theo nguyên tắc không cần phải sử dụng nhiều công sức vào việc mô hình hóa đối tượng, trong trường hợp việc mô hình hóa là rất khó khăn.

Khi điều khiển nơ-ron, động học hệ thống phi tuyến chưa biết được xấp xỉ bằng cách tuyến tính hóa hoặc bằng mạng nơ ron hàm cơ sở hướng tâm (RBF) Trong các bước điều khiển nơ-ron trước đây, kỹ thuật tối ưu được sử dụng chính để thu được luật thích nghi thông số. Thiết kế điều khiển nơ-ron hầu hết được thông qua mô phỏng hoặc bằng các ví dụ thí nghiệm thực tế. Sự bất lợi của bộ điều khiển nơ- ron dựa trên tối ưu hóa, là rất khó phân tích tính ổn định và đánh giá chất lượng của hệ thống kín [40].

Để vượt qua được những vấn đề này, những phương pháp điều khiển nơ-ron thích nghi [41] được đề xuất dựa trên kỹ thuật điều khiển thích nghi bền vững. Phương pháp điều khiển nơ-ron thích nghi này đã có những bước tiến vượt bậc phù hợp với hệ thống phi tuyến kiểu hàm số phức tạp và bất định không biết trước [42], [43]. Thứ nhất mạng nơ-ron RBF có khả năng xấp xỉ hàm vạn năng và được sử dụng rộng rãi trong nhận dạng và điều khiển thích nghi [44]; thứ hai mạng nơ-ron RBF có thể được biểu diễn theo mẫu hồi quy tham số tuyến tính, là tích của véc-tơ trọng số nơ-ron và véc-tơ hồi quy. Trong đó, thành phần của véc-tơ hồi quy là những hàm phi tuyến đầu vào của mạng RBF; thứ ba mạng nơ-ron RBF với tín hiệu vào là những hàm có chu kỳ thì có véc-tơ hồi quy thỏa mãn điều kiện kích thích bền PE [45]. Về mặt lý thuyết, các tham số phi tuyến chưa biết có thể được xác định thông qua mạng nơ-ron và các hệ thống logic mờ [46]. Ví dụ, Chen et al. [47] đã khai thác mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm để tính toán các tham số chưa biết trong hệ thống, sau đó sử dụng trong bộ điều khiển quy hoạch động cho một lớp hệ thống phi tuyến phản hồi chặt và đồng bộ hóa nhiều nền tảng để theo dõi quỹ đạo, các tác giả đã sử dụng mạng nơ-ron thích nghi để điều khiển dự báo cho đối tượng AUV phi tuyến [48]. Nhìn chung các nghiên cứu mới này đã chứng minh được tính hiệu quả của bộ điều khiển [51].

#### ***3.4.1. Tổng hợp bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) thích nghi Nơ-ron cho AUV***

Khi xây dựng mô hình các ma trận C và D theo hệ phương trình (2.23) thì hai phương trình  $f_1(X)$ ,  $f_2(X)$  đều chứa các thành phần ma trận C, D. Tuy nhiên, không thể xác định chính xác nhiều tác động từ bên ngoài vào AUV, do đó NCS đề xuất bộ điều khiển trượt tầng thích nghi mạng nơ-ron để xấp xỉ gần đúng hàm  $f_2(X)$  chứa nhiều phần tử của ma trận bất định C, D. Cấu trúc ANHSMC được xây dựng như hình 3.9, bao gồm khối điều khiển (Controller), khối đối tượng (Plant), nhiễu và các khối tín hiệu đầu vào ra.



Hình 3.9. Cấu trúc bộ điều khiển HSMC thích nghi Nơ ron

Bộ điều khiển trượt tầng thích nghi nơ-ron được triển khai như sau:

Phương trình  $f_2(X)$  trong (3.35) được viết lại như sau:

$$\dot{v}_2 = f_2(v) + g_2(v)u \quad (3.44)$$

Với

$$f_2(v) = -M_{22}^{-1} \left[ M_{21} \bar{M}^{-1} (-\bar{C}_1 v_1 - \bar{C}_2 v_2) + (C_{21} + D_{21}) v_1 + (C_{22} + D_{22}) v_2 \right]$$

$$g_2(v) = -M_{22}^{-1} M_{21} \bar{M}^{-1}$$

Hàm phi tuyến dùng để xấp xỉ các thành phần bất định như sau:

$$\zeta = W^T h(H^T v_2) + \varepsilon(v) \quad (3.45)$$

$A \in R^{n \times n}$  là ma trận Hurwitz tùy chọn, do đó  $f_2(v)$  được tổng hợp lại như sau:

$$f_2(v) = Av_2 + \zeta(v) \quad (3.46)$$

Thay (3.46) vào (3.44) ta có

$$\dot{v}_2(t) = Av_2 + W^T h(H^T v_2) + g_2(v)u + \varepsilon(v) \quad (3.47)$$

Do đó hàm xấp xỉ được xây dựng như sau:

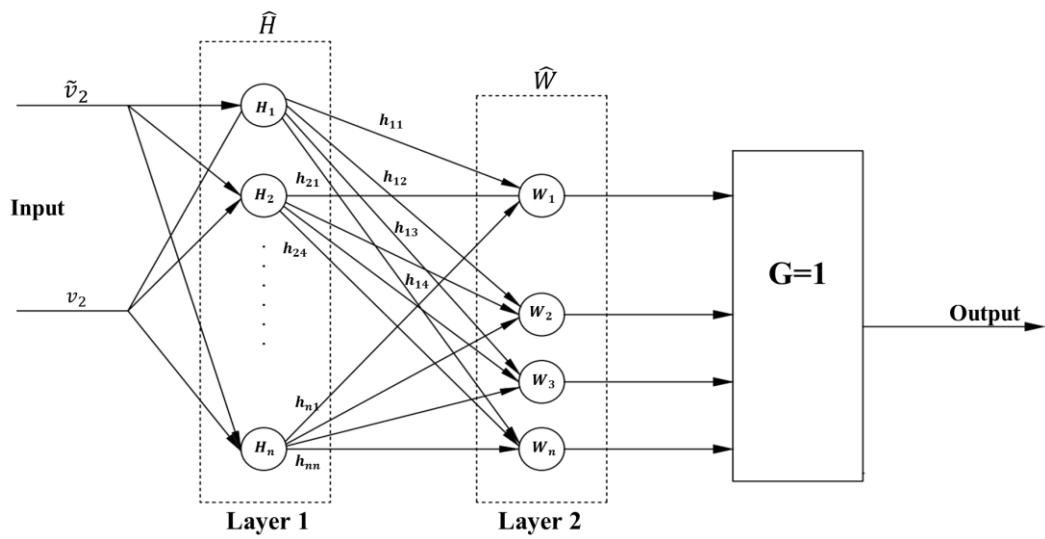
$$\dot{\hat{v}}_2(t) = A\hat{v}_2 + \hat{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + g_2(\hat{v})u + C\tilde{v}_2(t) \quad (3.48)$$

Với  $\hat{W} \in R^{N \times n}$ ,  $\hat{Y} \in R^{n \times N}$  là các ma trận trọng số;  $C \in R^{n \times n}$ ,  $N$  là số chiều của đầu vào,  $n$  là số nút của mạng nơ-ron.

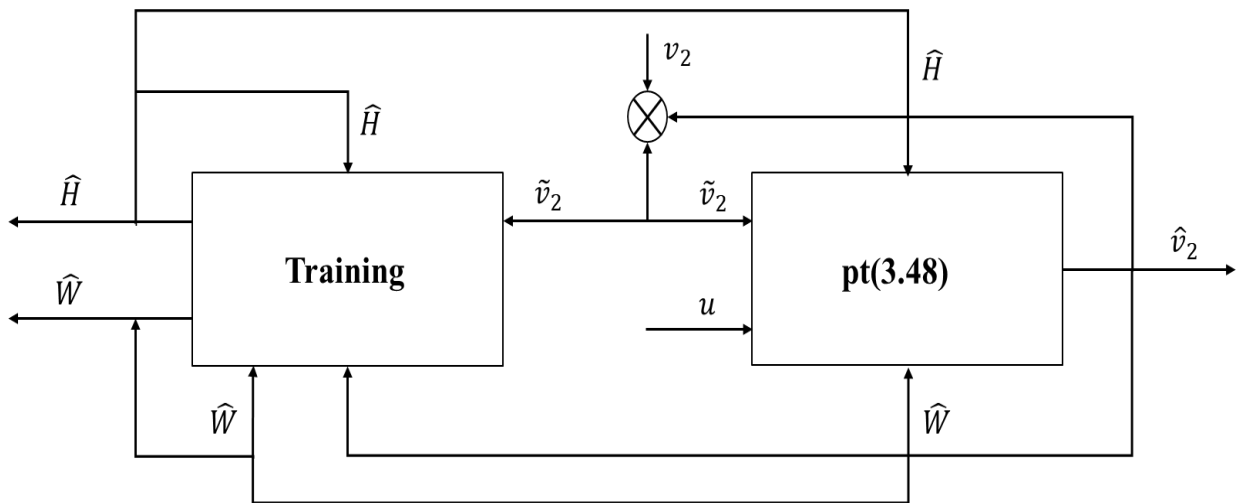
Luận án sẽ sử dụng một mạng nơ-ron hướng tâm (RBF) hai lớp để xấp xỉ véc-tơ hàm bất định như công thức (3.48). Lớp vào gồm  $n$  nơ-ron hướng tâm, lớp ra gồm  $n$  nơ-ron tuyến tính. Cấu trúc của mạng RBF sử dụng trong luận án

được thể hiện trong hình 3.10. Đầu vào là véc-tơ vận tốc dài theo các phương  $Ox, Oy, Oz$  và tốc độ quay xung quanh trục  $Oz$ ,  $v_2 = [u, v, w, r]^T$  và sai số của véc-tơ vận tốc dài  $\tilde{v}_2$  (hình 3.10).

Đầu ra của lớp vào được định nghĩa là Layer 1 có thông số ước lượng được tính  $\underline{H} = [H_1, H_2, \dots, H_n]^T \in R^n$ ,  $W$  là bộ trọng số tối ưu của mạng nơ-ron,  $\hat{W}$  là ước lượng của  $W$  được định nghĩa trong layer 2,  $\tilde{W}$  là sai số trọng số,  $G=1$  là hàm truyền thẳng để xuất tín hiệu ra output chính là hàm  $f_2(v)$  như cấu trúc tổng quát hình 3.9.



Hình 3.10. Cấu trúc mạng Nơ – ron hướng tâm RBF



Hình 3.11. Cấu trúc huấn luyện mạng Nơ ron

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. Cấu trúc huấn luyện mạng RBF được mô tả trong hình 3.11 với lớp vào là  $v_2$  và  $\tilde{v}_2$  để đưa ra 2 thông số ước lượng và trọng số tối ưu của mạng nơ-ron tạo thành phương trình 3.49 là phương trình khai báo trong bộ điều khiển ANHSMC. Phần tiếp theo sau công thức 3.49 NCS lựa chọn hàm Lyapunov để chứng minh tính ổn định của bộ điều khiển.

Từ phương trình (3.47) và (3.48), sai số ước lượng được tính như sau:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{v}}_2 &= A_c \tilde{v}_2(t) + \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \delta(v) \\ \delta(v) &= W^T [h(H^T v_2) - h(\hat{H}^T \hat{v}_2)] + [g_2(v) - g_2(\hat{v})]u + \varepsilon(v)\end{aligned}\quad (3.49)$$

Với  $A_c = A - C$ ;  $\tilde{v}_2(t) = v_2(t) - \hat{v}_2(t)$ ;  $\tilde{W} = W - \hat{W}$ .

Dựa vào định lý ổn định, hàm Lyapunov được chọn như sau

$$V = \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \tilde{v}_2 + tr(\tilde{W}^T F_1 \tilde{W}) + tr(\tilde{H}^T F_2 \tilde{H}) \quad (3.50)$$

Với

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \tilde{v}_2 \quad (3.51)$$

$$V_2 = tr(\tilde{W}^T F_1 \tilde{W}) + tr(\tilde{H}^T F_2 \tilde{H}) \quad (3.52)$$

Đầu tiên đạo hàm của hàm  $V_1$  được tính như sau:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \frac{1}{2} [\dot{\tilde{v}}_2^T P \tilde{v}_2 + \tilde{v}_2^T P \dot{\tilde{v}}_2] \\ &= \frac{1}{2} \left[ (A_c \tilde{v}_2)^T + (\tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2))^T + \delta^T(v) \right] P \tilde{v}_2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P [A_c \tilde{v}_2 + \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \delta(v)] \\ &= \frac{1}{2} \left[ \tilde{v}_2^T A_c^T + (\tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2))^T + \delta^T(v) \right] P \tilde{v}_2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P A_c \tilde{v}_2 + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \delta(v) \\ &= \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T A_c^T P \tilde{v}_2 + \frac{1}{2} (\tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2))^T P \tilde{v}_2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \delta^T P \tilde{v}_2 + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P A_c \tilde{v}_2 + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \delta(v)\end{aligned}\quad (3.53)$$

Áp dụng tính chất ma trận:

$$X^T AY = X.(AY) = (AY).X = (AY)^T X = Y^T A^T X = Y^T AX ; \quad \forall X, Y \in R^{n \times 1}$$

Và

$$A_c^T P + PA_c = -\gamma I_n$$

Với “dot” là phép nhân tích chập trên tập  $R^n$ ;  $\gamma \geq 0$ ;  $I_n$  là ma trận xác định;  
 $P \in R^{n \times n}$  là ma trận đối xứng xác định dương.

Do đó:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -\frac{\theta}{2} \tilde{v}_2^T \tilde{v}_2 + \frac{1}{2} \tilde{v}_2^T P \left[ \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \delta(v) \right] \\ \Rightarrow \dot{V}_1 &\leq -\frac{\theta}{2} \|\tilde{v}_2\|^2 + \|\tilde{v}_2\| \|P\| (\|\tilde{W}\| h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \delta_m) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Tương tự như trên, đạo hàm của hàm  $V_2$  được tính:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= tr \left\{ \tilde{W}^T F_1^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} + tr \left\{ \tilde{H}^T F_2^{-1} \dot{\tilde{H}} \right\} \\ &= tr \left\{ \tilde{W}^T F_1^{-1} (\dot{W} - \dot{\tilde{W}}) \right\} + tr \left\{ \tilde{H}^T F_2^{-1} (\dot{Y} - \dot{\tilde{H}}) \right\} \\ &= tr \left\{ -\tilde{W}^T F_1^{-1} \dot{\tilde{W}} \right\} + tr \left\{ -\tilde{H}^T F_2^{-1} \dot{\tilde{H}} \right\} \end{aligned} \quad (3.55)$$

Để hệ thống có thể ổn định và hoạt động mạnh, chọn luật cập nhật trọng số như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{W}} &= -F_1 h(\hat{H}^T \hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} - \psi_1 \|\tilde{v}_2\| \hat{W} \\ \dot{\tilde{H}} &= -F_2 sign(\hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} \hat{W}^T \left[ I_N - \phi(\hat{H}^T \hat{v}_2) \right] - \psi_2 \|\tilde{v}_2\| \hat{H} \end{aligned}$$

Thay vào (3.55) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= tr \left\{ \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} + \frac{\psi_1}{F_1} \|\tilde{v}_2\| \tilde{W}^T \hat{W} \right\} \\ &\quad + tr \left\{ \tilde{Y}^T sign(\hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} \hat{W}^T \left[ I_N - \phi(\hat{H}^T \hat{v}_2) \right] + \frac{\psi_2}{F_2} \|\tilde{v}_2\| \tilde{H}^T \hat{H} \right\} \\ &= tr \left\{ \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} + \frac{\psi_1}{F_1} \|\tilde{v}_2\| \tilde{W}^T (W - \tilde{W}) \right\} \\ &\quad + tr \left\{ \tilde{Y}^T sign(\hat{v}_2) \tilde{v}_2^T A_c^{-1} (H - \tilde{H})^T \left[ I_N - \phi(\hat{H}^T \hat{v}_2) \right] + \frac{\psi_2}{F_2} \|\tilde{v}_2\| \tilde{H}^T (H - \tilde{H}) \right\} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Bằng cách sử dụng các tính chất ma trận dưới đây

$$tr(XY^T) = tr(Y^T X) = Y^T X; \forall X, Y \in R^{n \times 1}$$

$$tr[\tilde{Z}^T (Z - \tilde{Z}^T)] \leq \|\tilde{Z}^T\|_F \|Z\|_F - \|\tilde{Z}^T\|_F^2; \forall Z, \tilde{Z} \in R^{N \times n}$$

Phương trình (3.56) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \tilde{v}_2^T A_c^{-1} \tilde{W}^T h(\hat{H}^T \hat{v}_2) + \frac{\psi_1}{F_1} \|\tilde{v}_2\| \text{tr} \left\{ \tilde{W}^T (W - \tilde{W}) \right\} \\
&\quad + \tilde{v}_2^T A_c^{-1} (W - \tilde{W}) \left[ I_{N_0} - \phi(\tilde{H}^T \hat{v}_2) \right] \tilde{H}^T \text{sign}(\tilde{v}_2) \\
&\quad + \frac{\psi_2}{F_2} \|\tilde{v}_2\| \text{tr} \left\{ \tilde{H}^T (H - \tilde{H}) \right\} \\
\Rightarrow \dot{V}_2 &\leq \alpha h(\hat{H}^T \hat{v}_2) \|\tilde{v}_2\| \|\tilde{W}\| + \frac{\psi_1}{F_1} \|\tilde{v}_2\| \left[ \|\tilde{W}^T\| \|W\| - \|\tilde{W}^T\|^2 \right] \\
&\quad + \alpha \|I_N - \phi(\tilde{H}^T \hat{v}_2)\| \|\tilde{v}_2\| (\|W\| + \|\tilde{W}\|) \|\tilde{H}\| \\
&\quad + \frac{\psi_2}{F_2} \|\tilde{v}_2\| \left( \|\tilde{H}^T\| \|H\| - \|\tilde{H}^T\|^2 \right) \\
\Rightarrow \dot{V}_2 &\leq \alpha h_m \|\tilde{v}_2\| \|\tilde{W}\| + \frac{\psi_1}{F_1} \|\tilde{v}_2\| \left[ \bar{W} \|\tilde{W}^T\| - \|\tilde{W}^T\|^2 \right] \\
&\quad + \alpha \|I_N - \phi(\tilde{H}^T \hat{v}_2)\| \|\tilde{v}_2\| (\bar{W} + \|\tilde{W}\|) \|\tilde{H}\| \\
&\quad + \frac{\psi_2}{F_2} \|\tilde{v}_2\| \left( \|\tilde{H}^T\| \bar{H} - \|\tilde{H}^T\|^2 \right)
\end{aligned}$$

Với  $h_m$ ,  $\bar{W}$  và  $\bar{H}$  lần lượt là giới hạn trên của  $h(\hat{Y}^T \hat{v}_2)$ ,  $\|W\|$  và  $\|H\|$ ;  $\|I_N - \phi(\tilde{H}^T \hat{v}_2)\| \leq 1$ ;  $\alpha = \|A_c^{-1}\|$

Lấy phương trình (3.54) trừ đi (3.56)

$$\dot{V} = -\frac{\theta}{2} \|\tilde{v}_2\|^2 + \|\tilde{v}_2\| \left\{ \left\| P \delta_m + \|\tilde{W}\| \left[ (\|P\| + \alpha) h_m + \frac{\psi_1}{F_1} \bar{W} \right] \right\| + \left( \alpha \bar{W} + \frac{\psi_2}{F_2} \bar{H} \right) \|\tilde{Y}\| - \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \|\tilde{W}\|^2 - \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \|\tilde{H}\|^2 - \left( \frac{\alpha}{2} \|\tilde{W}\| - \|\tilde{H}\| \right)^2 \right\} \quad (3.57)$$

Định nghĩa

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= \frac{(\|P\| + \alpha) h_m + \frac{\psi_1}{F_1} \bar{W}}{2 \left( \frac{\alpha^2}{4} - \frac{\psi_1}{F_1} \right)} = \frac{2F_1 (\|P\| + \alpha) h_m + 2\psi_1 \bar{W}}{\alpha^2 F_1 - 4\psi_1} \\
\beta_2 &= \frac{\alpha \bar{W} + \frac{\psi_2}{F_2} \bar{H}}{2 \left( 1 - \frac{\psi_2}{F_2} \right)} = \frac{\alpha F_2 \bar{W} + \psi_2 \bar{H}}{2(F_2 - \psi_2)}
\end{aligned}$$

Do đó phương trình (3.57) được biến đổi như sau:

$$\dot{V} \leq -\frac{\theta}{2}\|\tilde{v}_2\|^2 + \|\tilde{v}_2\| \left\{ \left\| P \right\| \delta_m + \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \beta_1^2 + \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \beta_2^2 - \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) (\|\tilde{W}\| + \beta_1)^2 - \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) (\|\tilde{H}\| + \beta_2)^2 - \left( \frac{\alpha}{2} \|\tilde{W}\| - \|\tilde{H}\| \right)^2 \right\} \quad (3.58)$$

Với

$$\psi_1 > \frac{F_1 \alpha^2}{4}; \quad \psi_2 > F_2$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov được tổng hợp lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\frac{\theta}{2}\|\tilde{v}_2\|^2 + \|\tilde{v}_2\| \left\{ \left\| P \right\| \delta_m + \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \beta_1^2 + \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \beta_2^2 \right\} \\ \Leftrightarrow \dot{V} &\leq \left\{ -\frac{\theta}{2}\|\tilde{v}_2\| + \left\| P \right\| \delta_m + \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \beta_1^2 + \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \beta_2^2 \right\} \|\tilde{v}_2\| \end{aligned} \quad (3.59)$$

Để đảm bảo điều kiện ổn định cho hệ thống chọn giới hạn như sau:

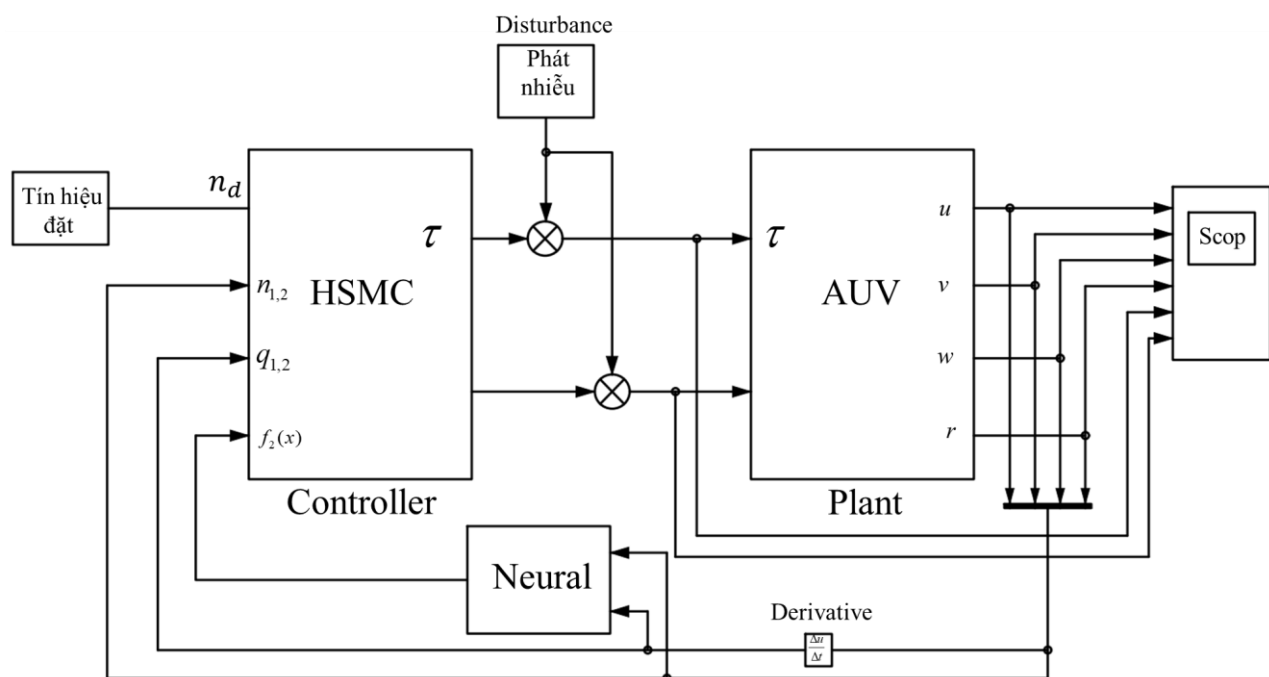
$$\|\tilde{v}_2\| \geq \frac{2 \left[ \left\| P \right\| \delta_m + \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \beta_1^2 + \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \beta_2^2 \right]}{\gamma} \quad (3.60)$$

Do đó đạo hàm của hàm Lyapunov luôn nhỏ hơn hoặc bằng 0, hệ thống ổn định tiệm cận.

$$\dot{V} \leq \left\{ -\frac{\theta}{2}\|\tilde{v}_2\| + \left\| P \right\| \delta_m + \left( \frac{\psi_1}{F_1} - \frac{\alpha^2}{4} \right) \beta_1^2 + \left( \frac{\psi_2}{F_2} - 1 \right) \beta_2^2 \right\} \|\tilde{v}_2\| \leq 0 \quad (3.61)$$

### 3.4.2. Phân tích kết quả mô phỏng

Cấu trúc bộ điều khiển trượt tầng bao gồm các tín hiệu đầu vào  $\eta_d = [x, y, z, \psi]^T$  là véc-tơ vị trí của tàu theo các trục  $Ox, Oy, Oz$  và góc điều hướng tàu quay quanh trục  $z$ . Vận tốc dài  $v = [u, v, w, r]^T$  gửi tín hiệu về bộ điều khiển HSMC để so sánh với tín hiệu đặt và đưa ra tín hiệu điều khiển trực tiếp  $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_w, \tau_r]^T$  đến đối tượng AUV như hình 3.12.



Hình 3.12. Sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt tầng HSMC thích nghi Nơ ron

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 sau:

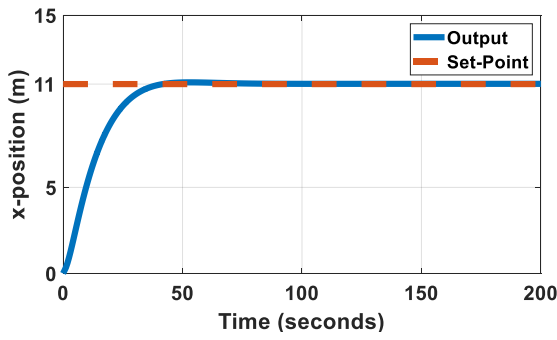
**Tham số mô hình thiết bị AUV [17] như bảng 2.2 trang 71**

**Bảng 3.2: Tham số bộ điều khiển ANHSMC**

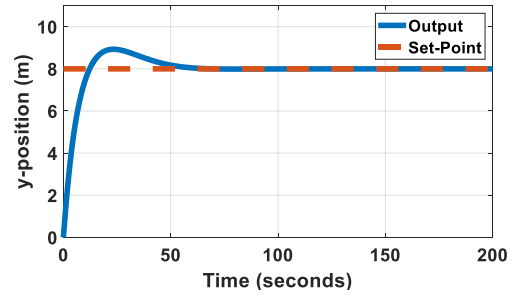
| Tham số  | Giá trị                                        | Tham số     | Giá trị  |
|----------|------------------------------------------------|-------------|----------|
| $k$      | 100                                            | $\lambda$   | 500      |
| $\delta$ | 5                                              | $\beta$     | 2.5      |
| $k_1$    | 0.1                                            | $\eta_{1d}$ | Constant |
| $k_2$    | 0.05                                           | $\eta_{2d}$ | Constant |
| $A_c$    | $\begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}$ | $F_1$       | 2        |
| $\psi_1$ | 1                                              | $F_2$       | 0.2      |
| $\psi_2$ | 0.3                                            | $n$         | 25       |

Trường hợp 1: Thiết bị AUV lặn xuống 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:

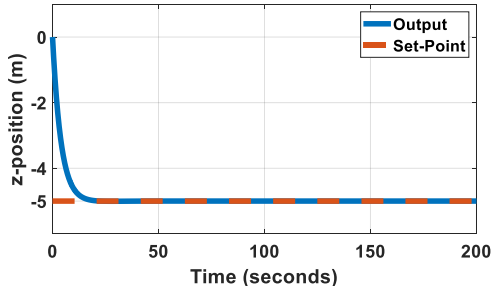
$$\eta_{1d} = [11 \quad 8]^T \text{ và } \eta_{2d} = [-5 \quad 0.6]^T$$



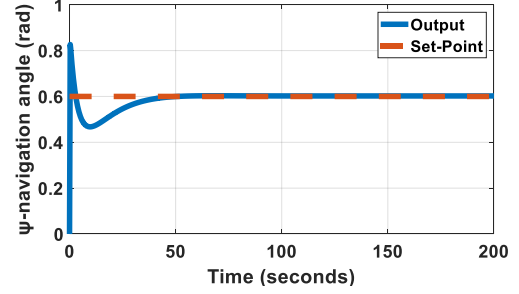
(a) Vị trí theo phương Ox



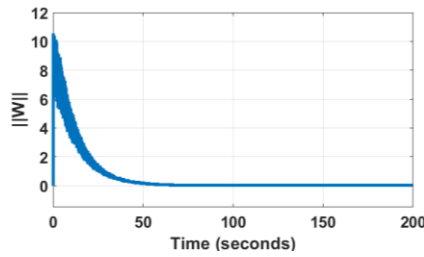
(b) Vị trí theo phương Oy



(b) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV

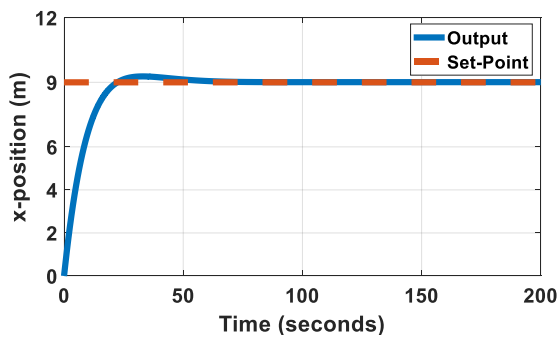


(e) Nhiễu tác động

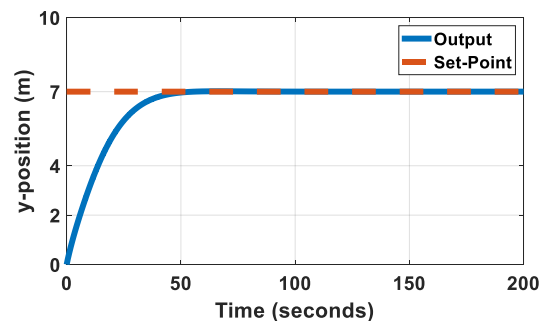
Hình 3.13. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 1 ANHSMC

Trường hợp 2: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tới -2 (m) tính từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như

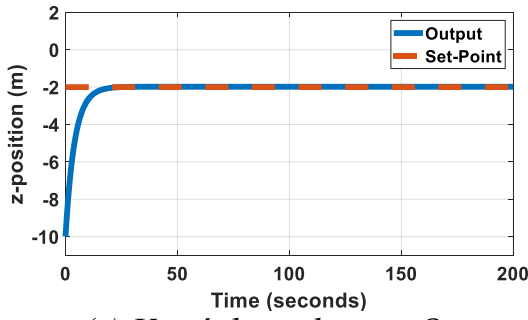
sau:  $\eta_{1d} = [9 \quad 7]^T$  và  $\eta_{2d} = [-2 \quad -0.5]^T$



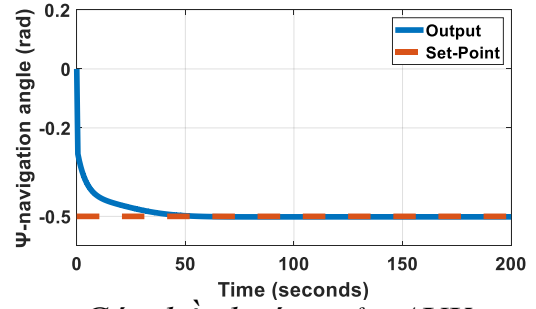
(a) Vị trí theo phương Ox



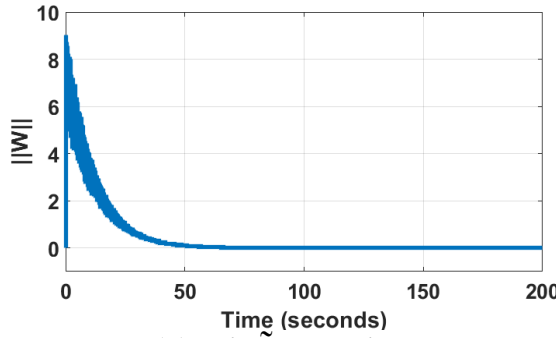
(b) Vị trí theo phương Oy



(c) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV



(e) Nhiễu tác động

Hình 3.14. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 2 ANHSMC

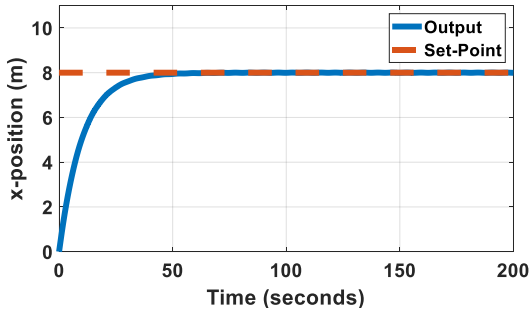
Kết quả mô phỏng Hình 3.13, 3.14 khi sử dụng bộ điều khiển trượt tăng thích nghi Nơ ron ANNHSMC cho thấy:

- Thời gian xác lập nhanh với các vị trí theo phương 0x, 0y, 0z và góc điều hướng tương ứng với trường hợp 1 và trường hợp 2 lần lượt là: 36s, 46s, 12s, 39s and 47s, 49s, 16s, 41s

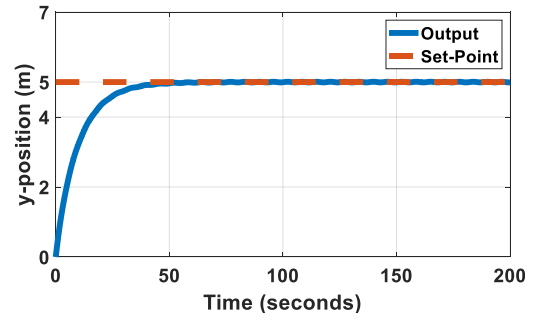
Với giải thuật này, đáp ứng hệ thiết bị lặn tự hành AUV bám theo tín hiệu mong muốn với độ vọt lố không đáng kể gần như bằng không hoặc nhỏ hơn 5%, sai số xác lập bằng không. Bên cạnh đó, định mức của cả hai thông số trọng lượng đều hội tụ về không. Sau đó, để xác minh tính ổn định của hiệu suất điều khiển trong AUV, NCS tác động vào hệ thống bằng nhiễu bên ngoài đối với tín hiệu điều khiển được xác định bởi:

Trường hợp 3: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -12 (m) tính từ mặt nước và đồng thời di chuyển đến vị trí mong muốn với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [8 \ 5]^T$  và  $\eta_{2d} = [-12 \ 0]^T$ . Tuy nhiên thiết bị chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:

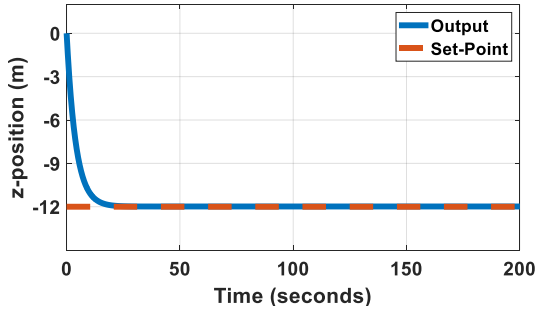
$$\Delta = [20\sin(0.01t) \ +10\cos(0.01t)]^T$$



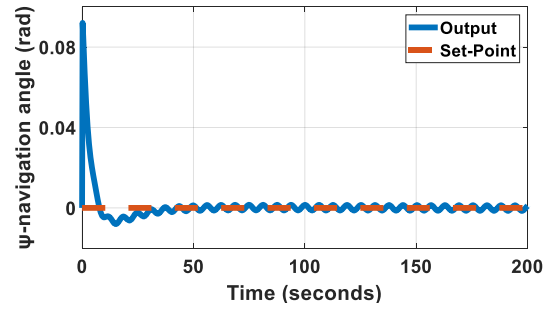
(a) Vị trí theo phương Ox



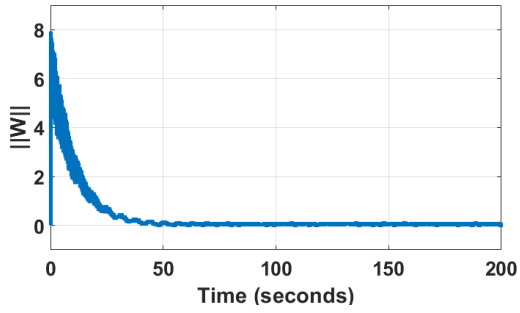
(b) Vị trí theo phương Oy



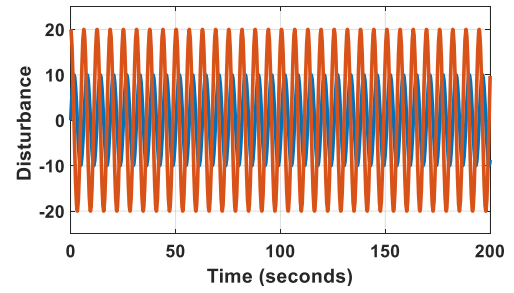
(c) Vị trí theo phương Oz



(d) Góc điều hướng của AUV



(e) Nhiễu tác động

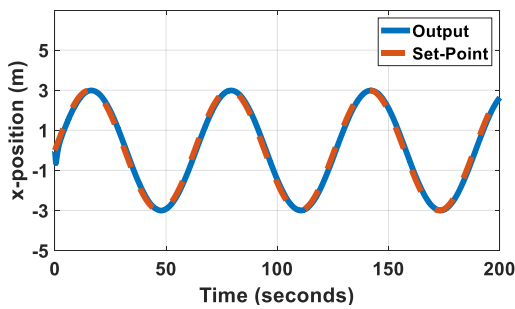


(f) Mô hình nhiễu

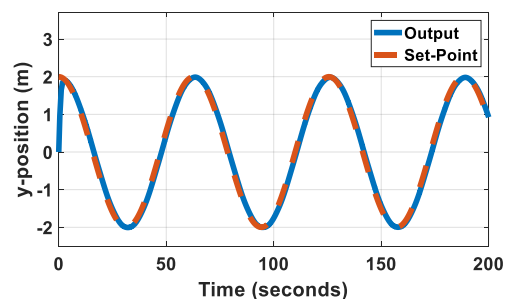
Hình 3.15. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 3 ANHSMC

Trường hợp 4: 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:

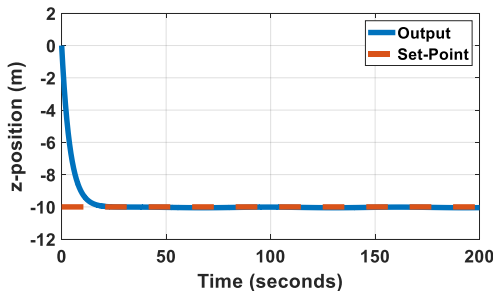
$$\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \quad 2\cos(0.01t)]^T \text{ and } \eta_{2d} = [-10 \quad 0]^T$$



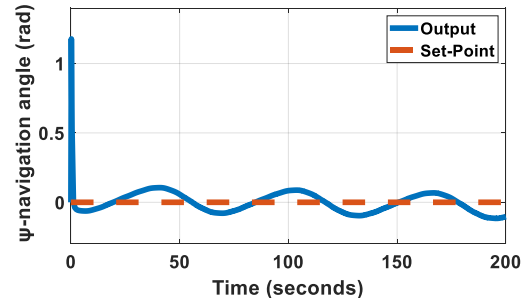
(a) Vị trí theo phương Ox



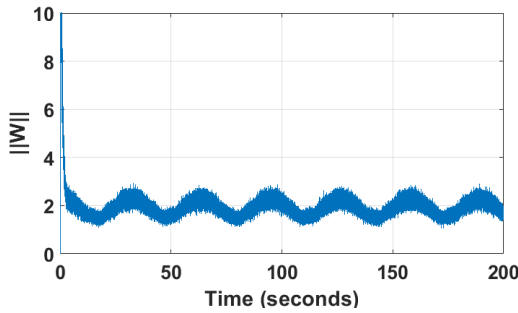
(b) Vị trí theo phương Oy



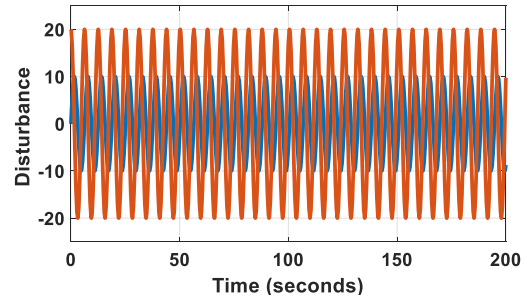
(c) Vị trí theo phương Oz



(f) Góc điều hướng của AUV



(e) Nhiễu tác động



(f) Mô hình nhiễu

Hình 3.16. Vị trí, độ sâu, góc điều hướng và nhiễu trường hợp 4 ANHSMC

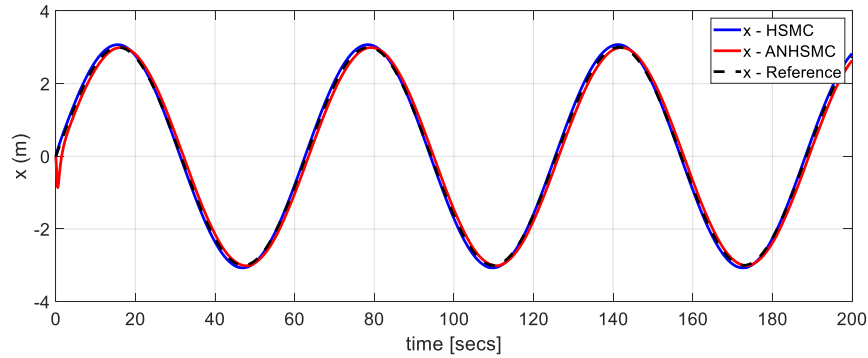
Theo kết quả mô phỏng, bộ điều khiển đề xuất phản ứng khá tốt với nhiễu bên ngoài và giữ cho hệ thống hoạt động ổn định. Các kết quả thu được trong Hình 3.15 và Hình 3.16 chứng minh tính ổn định của hệ thống ngay cả khi có nhiễu tác động. Đặc biệt, chất lượng điều khiển trong  $0x$ ,  $0y$  khi theo dõi quỹ đạo hàm tuần hoàn cũng rất tốt như trong Hình 3.16 a và Hình 3.16 b. Tương tự như vậy, chất lượng vị trí ở  $0z$  và góc điều hướng cũng bám vị trí khá tốt. Do đó, các kết quả thu được theo bộ điều khiển HSMC thích nghi Nơ ron tiêu chuẩn có thể được coi là lý tưởng.

### 3.5. So sánh kết quả mô phỏng bộ điều khiển HSMC với thích nghi Nơ-ron HSMC (ANHSMC)

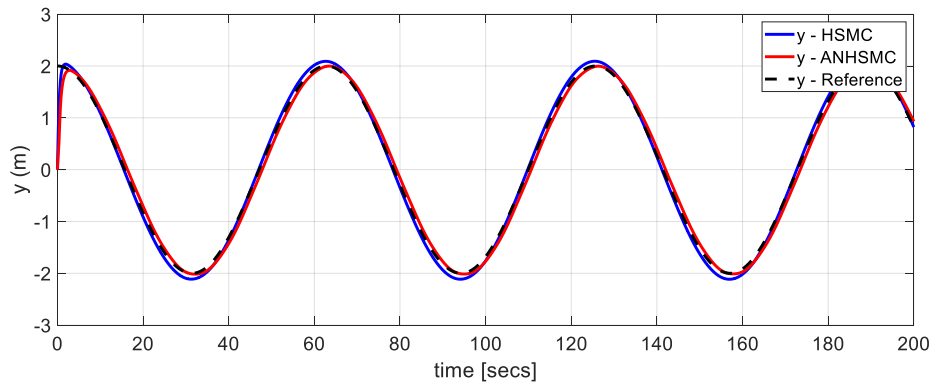
Tương tự như cách khai báo hàm Khai báo hàm m-file trên Matlab như phần cuối chương hai khi so sánh phương pháp điều khiển Backstepping với Backstepping thích nghi mờ. NCS kế thừa phần khai báo cho 2 phương pháp điều khiển cần so sánh là HSMC và HSMC thích nghi Nơ – ron.

Khai báo hàm m-file trên Matlab các thông số so sánh hai bộ điều khiển với 3 bộ thông số để lấy đường đặc tính (blue, red, black) trên cùng một đồ thị và 5 hình vẽ (figure 1 – figure 5) gồm các đáp ứng theo trục x của AUV (hình

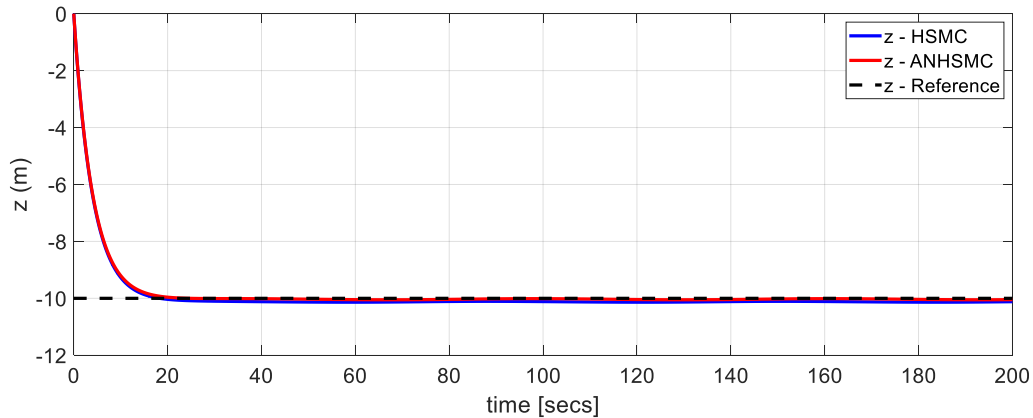
3.16a), đáp ứng theo trục y (hình 3.16b), đáp ứng theo trục z (hình 3.16c) và đáp ứng theo quỹ đạo x, y (hình 3.16d) theo kịch bản mô phỏng: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \ 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-10 \ 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [10\sin(0.01t) \ 5\cos(0.01t)]^T$



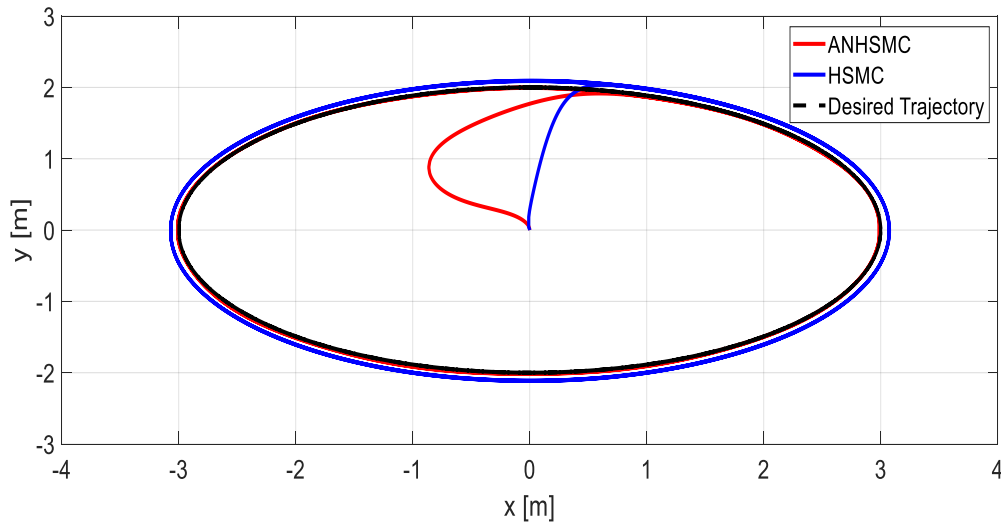
Hình 3.17a. Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



Hình 3.17b. Đáp ứng theo trục y của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC

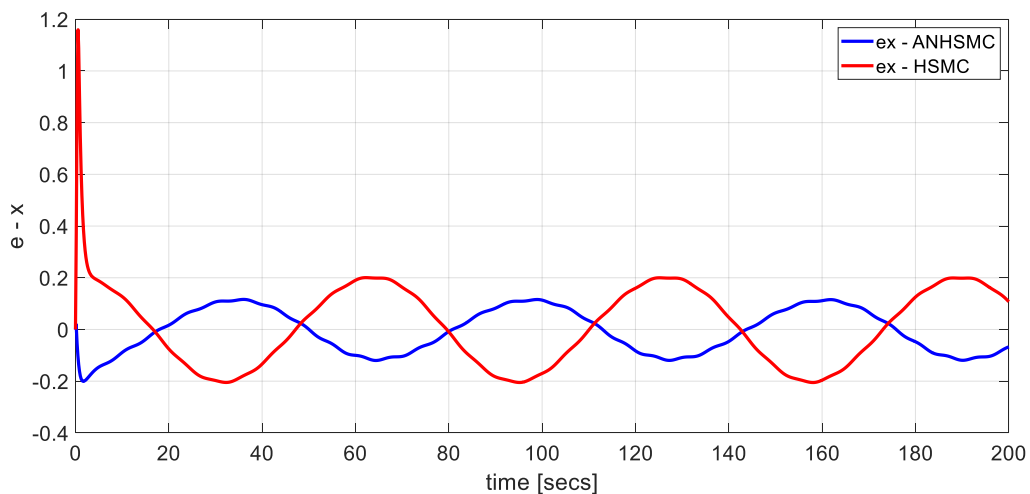


Hình 3.17c. Đáp ứng theo trục x của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC

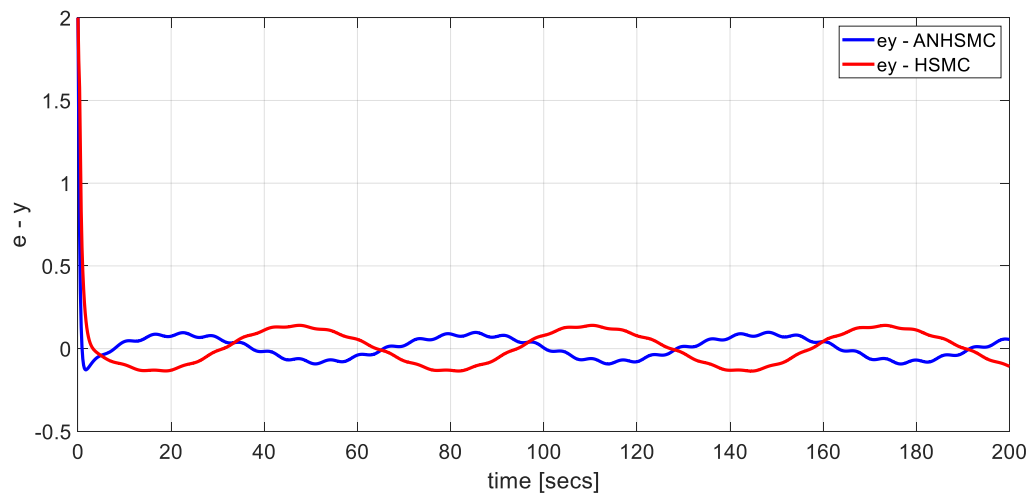


Hình 3.17d. Quỹ đạo theo trục  $x, y$  của AUV với 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC

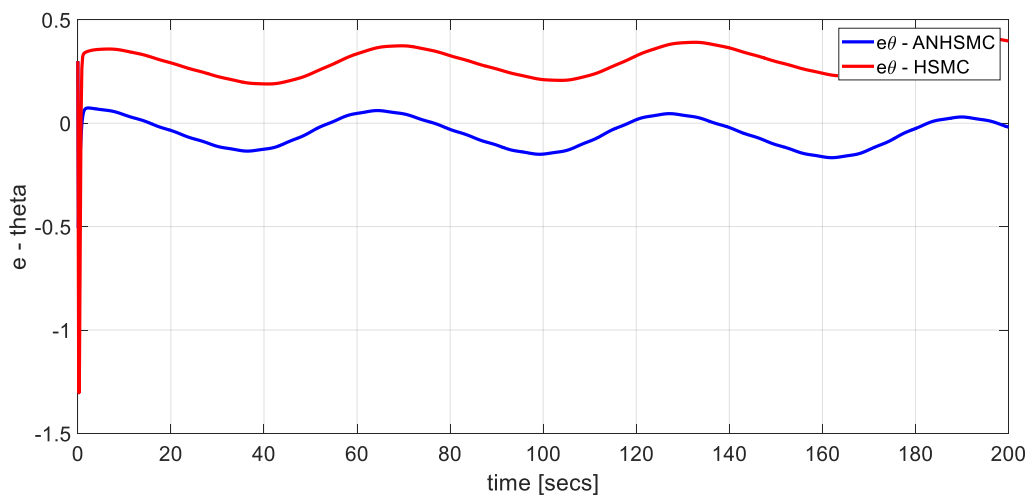
Theo kết quả mô phỏng trên, bộ điều khiển trượt tầng HSMC thích nghi Nơ ron cho chất lượng điều khiển tốt hơn HSMC thông thường. Giảm hiện tượng dao động khi chuyển mạch xung quanh mặt trượt hệ thống hơn khi sử dụng bộ điều khiển trượt tầng (HSMC), các giá trị mô phỏng bám sát với giá trị đặt mong muốn và gần như độ quá điều chỉnh là rất nhỏ. Phương pháp thích nghi nơ-ron ANHSMC đã xấp xỉ các thông số khó xác định trong thực tế nhằm mục đích nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo tối ưu nhất. Kết quả này được NCS cụ thể trong mô phỏng so sánh sai số giữa tín hiệu của hai bộ điều khiển với tín hiệu đặt theo đồ thị.



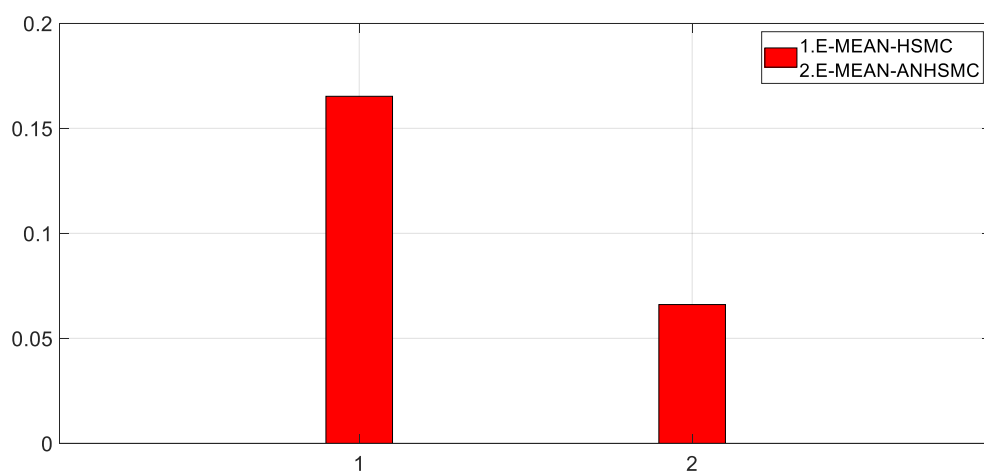
Hình 3.18a. Sai số so với tín hiệu đặt trục  $x$  của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



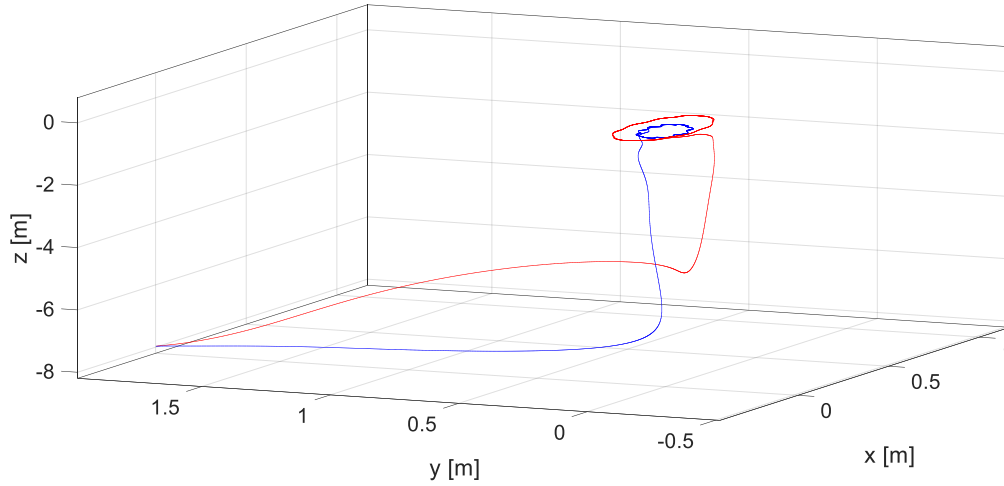
Hình 3.18b. Sai số so với tín hiệu đặt trực y của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



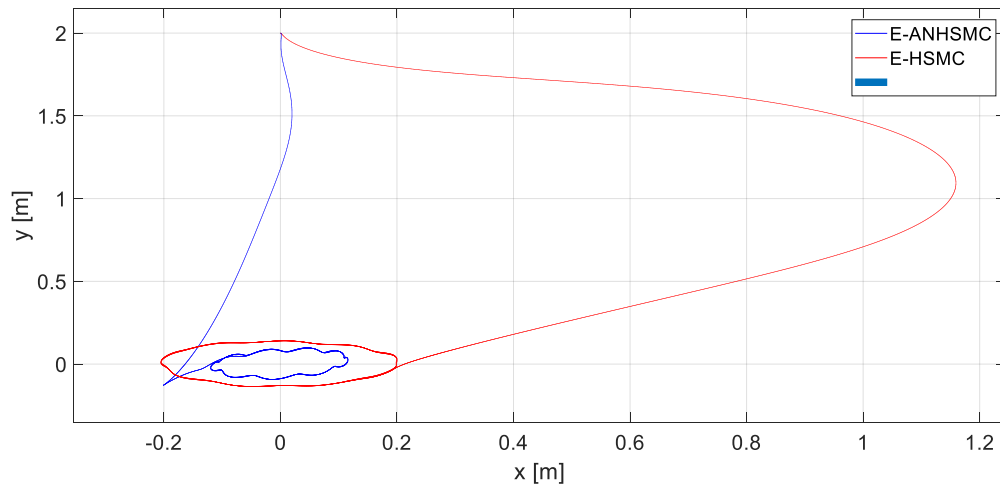
Hình 3.18c. Sai số so với tín hiệu đặt trực theta của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



Hình 3.18d. Sai số trung bình với tín hiệu đặt của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



Hình 3.18e. Sai số trong không gian 3D của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC



Hình 3.18f. Sai số trong không gian 2D của 2 bộ điều khiển HSMC và ANHSMC

Cả bộ điều khiển HSMC và bộ điều khiển ANHSMC đều mang lại chất lượng tốt ngay cả khi có nhiễu ngoài tác động vào AUV. Trong trường hợp mô hình khó xác định và muốn có bộ điều khiển bền vững với nhiễu thì nên lựa chọn ANHSMC. Nhưng để thiết kế được ANHSMC thì đòi hỏi người sử dụng phải đầu tư rất nhiều thời gian để tự thu thập kinh nghiệm lựa chọn ra thông số bộ điều khiển phù hợp. Tuy nhiên khi cài đặt ANHSMC cần lựa chọn các vi điều khiển có tốc độ xử lý nhanh để đảm bảo tính thời gian thực cho hệ thống vì việc huấn luyện mạng được thực hiện trực tuyến (online). Đặc tính của hai bộ điều khiển được so sánh trong bảng sau:

**Bảng 3.3: So sánh đặc tính bộ điều khiển HSMC và ANHSMC**

| Đặc tính                                         | HSMC                  | ANHSMC                                        |
|--------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| Thời gian bám vị trí (s)                         | 40                    | 35                                            |
| Sai số lớn nhất so với tín hiệu đặt phương x (m) | 1.2                   | 0.2                                           |
| Sai số trung bình                                | 0.16                  | 0.06                                          |
| Giới hạn bao miền lân cận gốc tọa độ             | 0.2                   | 0.1                                           |
| Dao động của tín hiệu điều khiển                 | Thay đổi nhỏ          | Thay đổi nhỏ                                  |
| Độ phức tạp của thuật toán điều khiển            | Phức tạp              | Đơn giản                                      |
| Yêu cầu kỹ thuật                                 | Thuật toán điều khiển | Thuật toán điều khiển<br>Bộ nhớ và chip xử lý |
| Đảm bảo về tính ổn định                          | Đảm bảo               | Khó đảm bảo                                   |

**Kết luận chương 3:**

Chương này NCS tập trung xây dựng thuật toán điều khiển HSMC và HSMC thích nghi nơ-ron cho mô hình tàu AUV 4 bậc tự do, bộ điều khiển là công trình kết hợp kỹ thuật điều khiển hiện đại với điều khiển thông minh tạo thành một hệ thống kín nhằm tối ưu chất lượng điều khiển cho AUV có thành phần bất định dạng hàm số. Các kỹ thuật điều khiển được kiểm chứng trên phần mềm chuyên dụng và cho kết quả tốt cả khi AUV bám theo quỹ đạo đặt trước.

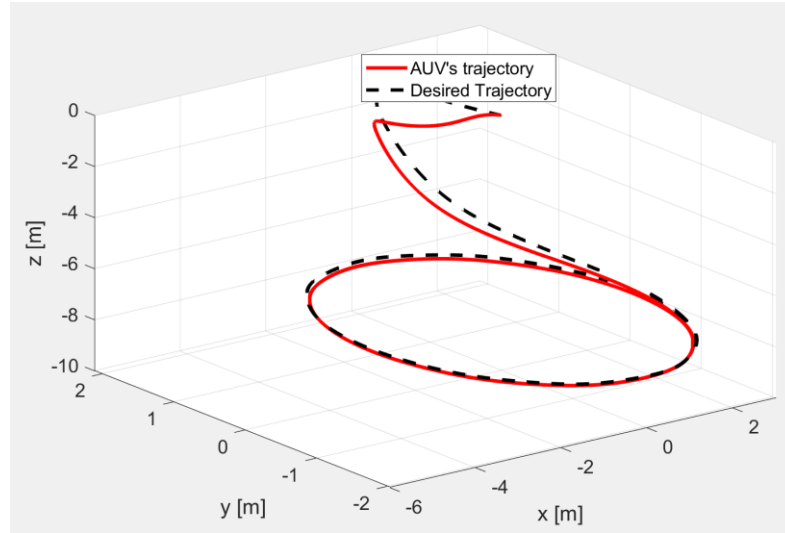
Như vậy có thể khẳng định chất lượng điều khiển của bộ điều khiển HSMC với những đặc tính được mô tả trên đồ thị bám quỹ đạo đặt tốt hơn so với phương pháp điều khiển đảm bảo bám quỹ đạo đặt trong phần chương 2 của luận án. Với thời gian xác lập giảm 15s (hình 3.17c) so với 19s (hình 2.15d) khi cùng lặn sâu 10m tính từ mặt nước. Độ quá điều chỉnh trong trường hợp điều khiển HSMC Nơ-ron cũng tốt hơn khoảng 5% (hình 2.15b) so với 2% (hình 3.17b) cùng với biên độ theo trục y là 2. Trong trường hợp ANHSMC điều khiển AUV bám theo quỹ đạo điều hòa với sai số rất nhỏ như hình 3.17.

Trong trường hợp muốn xác định AUV bám quỹ đạo trong không gian 3 chiều thì khai báo hàm m-file trên Matlab như sau:

```
plot3(x.Data,y.Data,z.Data,'red','linewidth',3.5); hold
on; grid on;
```

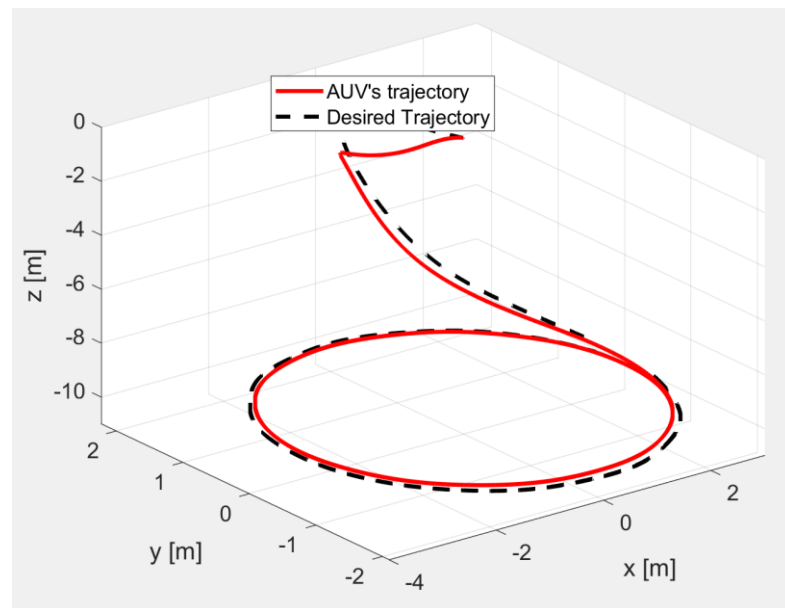
```
plot3(x_d.Data,y_d.Data,z_d.Data,'black--','linewidth',3);
xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]'); zlabel('z [m]');
legend("AUV's trajectory","Desired Trajectory");
```

Đặc tính đáp ứng được xác định như hình 3.19 với điểm xuất phát trong không gian tọa độ  $(0, 0, 0)$ , lặn xuống độ sâu 8 mét và quay quanh quỹ đạo đặt là quỹ đạo điều hòa  $\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \ 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-8 \ 0]^T$



Hình 3.19. AUV bám theo quỹ đạo của bộ điều khiển ANHSMC lặn sâu 8m

Đặc tính đáp ứng được xác định như hình 3.20 với điểm xuất phát trong không gian tọa độ  $(0, 0, 0)$ , lặn xuống độ sâu 10 mét và quay quanh quỹ đạo đặt là quỹ đạo điều hòa  $\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \ 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-10 \ 0]^T$



Hình 3.20. AUV bám theo quỹ đạo của bộ điều khiển ANHSMC lặn sâu 10m

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Kết luận:

Luận án đã lựa chọn mô hình phương tiện chuyển động ngầm AUV 4 bậc tự do hệ thiếu cơ cấu chấp hành là đối tượng ứng dụng để mở ra hướng nghiên cứu mới cho kỹ thuật điều khiển hiện đại. Với nhiệm vụ đặt ra là nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của phương tiện chuyển động ngầm AUV 4 DOF, luận án đã đạt được một số kết quả như sau:

- Xây dựng thành công bộ điều khiển Backstepping kiểm chứng mô hình và đảm bảo quỹ đạo cho AUV 4 DOF hệ thiếu cơ cấu chấp hành.

- Ứng dụng bộ điều khiển backstepping thích nghi sử dụng hệ logic mờ để chỉnh định tham số của bộ điều khiển.

- Khẳng định ưu điểm của bộ điều khiển kép Adaptive Fuzzy Backstepping (AFB) về độ bền vững với nhiễu và thời gian quá độ giảm.

- Luận án nghiên cứu thành công phương pháp điều khiển trượt tầng Hierarchical Sliding Mode Controller (HSMC) thích nghi nơ-ron cho mô hình AUV 4DOF thiếu cơ cấu chấp hành. Thông qua định lý Lyapunov chứng minh được tính ổn định của hệ thống.

- Luận án so sánh các bộ điều khiển AUV hệ thiếu cơ cấu chấp hành với nhau để đưa ra đánh giá cho người dùng lựa chọn các bộ điều khiển. Trong trường hợp mô hình khó xác định và muốn có bộ điều khiển cài đặt đơn giản thì nên dùng AFB hoặc ANHSMC. Trong trường hợp không muốn đầu tư thời gian vào thiết kế mà vẫn đảm bảo về chất lượng ổn định thì người sử dụng nên chọn BCS hoặc HSMC. Trong trường hợp phải lựa chọn 2 bộ điều khiển phi tuyến thì nên ưu tiên lựa chọn HSMC vì những ưu việt hơn về chất lượng điều khiển (mô phỏng trong phần phụ lục 2) như điều khiển trực tiếp thu thập dữ liệu dạng online, độ quá điều chỉnh nhỏ và thời gian xác lập ngắn hơn.

- Bộ điều khiển Backstepping đảm bảo bám quỹ đạo kiểm chứng mô hình AUV 4 DOF, HSMC nơ-ron dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo là phương án khả thi nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo của phương tiện chuyển động ngầm được trình bày trong luận án “Nghiên cứu nâng cao chất lượng bám quỹ

đạo của phương tiện chuyển động ngầm”. Các kết quả mô phỏng từng bộ điều khiển với nhau đã chứng minh các mục tiêu của luận án đạt được.

**Kiến nghị:**

Luận án mới chỉ tập trung nghiên cứu các giải thuật điều khiển phi tuyến và phi tuyến thích nghi để nâng cao chất lượng bám quỹ đạo của phương tiện chuyển động ngầm, mô hình động lực học chủ yếu dựa trên mô hình mô phỏng theo thông số cố định bám quỹ đạo trên mặt phẳng ngang. Việc áp dụng các bộ điều khiển chỉ mô phỏng một số tình huống trên máy tính với số lần hạn chế, tình huống hạn chế. NCS dành công việc này cho những nghiên cứu trong tương lai gần.

Mô hình AUV là mô hình liên tục với các thông số thay đổi theo thời gian, các bộ điều khiển phi tuyến cũng là liên tục nên cần thêm những bộ chuyển đổi để đưa về bộ xử lý là các máy tính số hiện nay trong điều kiện thời gian thực. Đặc biệt là việc sử dụng các tín hiệu điều khiển này cho các cơ cấu truyền động khác nhau trên AUV là bài toán hoàn thiện để triển khai thực nghiệm kiểm chứng thuật toán điều khiển cần phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.

## NHỮNG CÔNG TRÌNH ĐÃ ĐƯỢC CÔNG BỐ

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Vũ Văn Quang, Đinh Anh Tuấn, Lê Xuân Hải, Kim Đình Thái, Trần Việt Hoàng, Nguyễn Anh Đức (2021). <i>Thiết kế bộ điều khiển Backstepping cho thiết bị lặn tự hành</i> , Tạp chí khoa học & công nghệ tập 57, số 4 (8/2021), tr. 43-48, P-ISSN 1859-3585 E-ISSN 2615-9619.                                                                                                                                                                 |
| 2 | Vu, Q. V., Dinh, T. A., Nguyen, T. V., Tran, H. V., Le, H. X., Pham, H. V., ... & Nguyen, L. (2021). <i>An Adaptive Hierarchical Sliding Mode Controller for Autonomous Underwater Vehicles</i> , Electronics, 10 (18), 2316. E-ISSN: 2079-9292 (Journal Q2).                                                                                                                                                                            |
| 3 | Van Quang Vu, Anh Tuan Dinh, Dung Manh Do, Gia Thinh Bui Hai Le Xuan, Linh Ngoc Nguyen (2022). <i>Adaptive Fuzzy Backstepping Controller for AUV Lacking Compliant Structure</i> , The 3rd International Conference on Human-centered Artificial Intelligence (Computing4Human) December 16 <sup>th</sup> , 2022 in Hanoi City, Vietnam. Hội thảo quốc tế về trí tuệ nhân tạo lấy con người làm trung tâm (Computing4Human) lần thứ III. |
| 4 | Vũ Văn Quang, Đinh Anh Tuấn, Bùi Gia Thịnh (2023) <i>Adaptive fuzzy hierarchical sliding mode controller for AUV lacking compliant structure</i> , Tạp chí khoa học & công nghệ tập 59, số 2B (4/2023), tr. 9-14, P-ISSN 1859-3585 E-ISSN 2615-9619                                                                                                                                                                                      |
| 5 | Van-Quang Vu, Anh-Tuan Dinh, Van-Diep Bui, Thi-Thanh Pham (2023), <i>Modeling the AUV Autonomous underground vehicles by lacking of actuators method</i> , International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM) Volume 5 , Issue 9, September 2023, Page No: 847-854 ISSN: 2395-5252 DOI: 10.35629/5252-0509847854.                                                                                                   |

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng việt

1. TS. Trần Ngọc Huy và TS. Tôn Thiện Phương (2019). *Báo cáo Xu hướng nghiên cứu và ứng dụng Robot ngầm tự hành phục vụ quan trắc môi trường, khảo sát sông hồ và cứu hộ cứu nạn*, Đề tài khoa học, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh, 41 trang.
2. Phạm Nhật Hồng (2006). *Nghiên cứu ứng dụng một số cảm biến siêu âm để thiết kế chế tạo hệ thống phát hiện, đo đạc các tham số vật bay trên không và thiết bị truyền tin dưới nước phục vụ kinh tế - xã hội, An ninh – quốc phòng*”. Đề tài khoa học, bộ quốc phòng, 2006.
3. Ban Chấp hành Trung ương Đảng (2018). *Nghị quyết số 36-NQ/TW ngày 22 tháng 10 năm 2018 về Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045*”.
4. <https://kienthuc.net.vn/tin-tuc-quan-su/viet-nam-thanh-lap-lu-doan-tau-ngam-189-239681.html>.
5. <https://vnexpress.net/interactive/2017/suc-manh-6-tau-ngam-kilo-viet-nam>, truy cập ngày 12/11/2018.
6. <https://cadn.com.vn/so-phan-tau-ngam-kri-nanggala-402-mat-tich-cua-indonesia-post241873.html>.
7. Nguyễn Đông (2015). *Phân tích thủy động lực học và thiết kế hệ thống điều khiển theo công nghệ hướng đối tượng cho phương tiện tự hành dưới nước*, luận văn tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
8. Nguyễn N. H. (2017). *Nghiên cứu phương pháp hướng đối tượng trong phân tích và thiết kế điều khiển chuyển động cho thiết bị tự hành AUV/ASV với chuẩn SysMLModelica và Automate lai*, luận văn tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
9. Trương Duy Trung (2014). *Xây dựng thuật toán dẫn đường và điều khiển cho phương tiện ngầm*, luận văn tiến sĩ, Viện khoa học và khoa học quân sự
10. Nguyễn Quang Huy (2020). *Nâng cao độ chính xác dẫn đường cho tàu ngầm hoạt động trong khu vực Biển đông*, luận văn tiến sĩ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

11. Hoàng Thị Tú Uyên (2018). *Nghiên cứu ứng dụng lý thuyết điều khiển thích nghi để nâng cao chất lượng hệ thống lái tự động tàu nổi có choáng nước*” luận văn tiến sĩ, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
12. Nguyễn Văn Tuấn. (2022). *Nghiên cứu tối ưu thiết kế một thiết bị lặn tự hành (AUV) cỡ nhỏ có bổ sung năng lượng*, luận văn tiến sĩ kỹ thuật cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội.

### **Tiếng anh**

13. Wynn, R.B., Huvenne, V.A.I., Le Bas, T.P., Murton, B.J., Connelly, D.P., Bett, B.J., Ruhl, H.A., Morris, K.J., Peakall, J., Parsons, D.R., Sumner, E.J., Darby, S.E., Dorrell, R.M., Hunt, J.E., (2014). *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience*. Mar. Geol. 352, 451–468. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.012>.
14. Graham LeBlanc (2011). *Design and Simulation of A Control Continuum for Tetherless Underwater Vehicles*, Master thesis, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia.
15. Douglas-Westwood (2010). *The AUV Market Place Hydrography/Geophysics: Oceanology International*. London, UK. <http://www.douglaswestwood.com/>.
16. T. I. Fossen, (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Chichester: John Wiley & Sons.
17. Van Tuan, N., Van Phong, D., & Hung, N. C. (2021) *Researching and Development of an Autonomous Underwater Vehicles with Capability of Collecting Solar Energy*. ISSN 2734-9373.
18. Zhang, J.; Xiang, X.; Zhang, Q.; Li, W. *Neural network-based adaptive trajectory tracking control of underactuated AUVs with unknown asymmetrical actuator saturation and unknown dynamics*. Ocean Eng. 2020, 218, 108193.
19. Eichhorn, M.; Ament, C.; Jacobi, M.; Pfuetzenreuter, T.; Karimanzira, D.; Bley, K.; Boer, M.; Wehde, H. *Modular AUV System with Integrated Real-Time Water Quality Analysis*. Sensors 2018, 18, 1837.

20. Hagen, P.; Storkersen, N.; Vestgard, K.; Kartvedt, P. *The HUGIN 1000 autonomous underwater vehicle for military applications*. In *Proceedings of the Oceans 2003, Celebrating the Past. Teaming toward the Future* (IEEE Cat. No.03CH37492), San Diego, CA, USA, 22–26 September 2003; Volume 2, pp. 1141–1145.
21. Liu, L.; Wang, D.; Peng, Z. *State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers*. *Ocean Eng.* 2019, 171, 625–632.
22. Van Nguyen, T.; Le, H.X.; Tran, H.V.; Nguyen, D.A.; Nguyen, M.N.; Nguyen, L. *An Efficient Approach for SIMO Systems using Adaptive Fuzzy Hierarchical Sliding Mode Control*. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Santa Maria da Feira, Portugal, 28–29 April 2021; pp. 85–90.
23. Le, V.A.; Le, H.X.; Nguyen, L.; Phan, M.X. *An Efficient Adaptive Hierarchical Sliding Mode Control Strategy Using Neural Networks for 3D Overhead Cranes*. *Int. J. Autom. Comput.* 2019, 16, 614–627.
24. Van Nguyen, T.; Le, H.X.; Tran, H.V.; Nguyen, D.A.; Nguyen, M.N.; Nguyen, L. *Adaptive Dynamic Programming based Control Scheme for Uncertain Two-Wheel Robots*. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Santa Maria da Feira, Portugal, 28–29 April 2021; pp. 111–116.
25. Tanakitkorn, K.; Wilson, P.A.; Turnock, S.R.; Phillips, A.B. *Depth control for an over-actuated, hover-capable autonomous underwater vehicle with experimental verification*. *Mechatronics* 2017, 41, 67–81.
26. Fang, K.; Fang, H.; Zhang, J.; Yao, J.; Li, J. *Neural adaptive output feedback tracking control of underactuated AUVs*. *Ocean Eng.* 2021, 234, 109211.
27. Katebi M. and Byrne J. (1988): *LQG adaptive ship autopilot*, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 10, pp. 187-197.

28. Honderd G. and Winkelman J. (Year): *An adaptive autopilot for ships*, in *Third Ship Control Systems Symposium, Ministry of Defence*, 1972.
29. Wu, Z., Peng, H., Hu, B., & Feng, X. (2021). *Trajectory tracking of a novel underactuated AUV via nonsingular integral terminal sliding mode control*. *IEEE Access*, 9, 103407-103418.
30. Utkin, V. *Variable Structure Systems with Sliding Modes*. *IEEE Trans Automat Contr*. 1977, 22(2) 212-222.
31. Bandyopadhyay, B., Deepak, F., Kim, K.S. *Sliding Mode Control using Novel Sliding Surfaces*, (Springer-Verlag Berlin) 2009, pp. 145.
32. Yan, X., Spurgeon, S.K., Edwards, C. *Variable Structure Control of Complex Systems*, (Springer-London, UK), 2016, pp. 363.
33. Sun, B., Zhu, D., Li, W. *An Integrated Backstepping and Sliding Mode Tracking Control Algorithm for Unmanned Underwater Vehicles*. 2012; (September) 3-5.
34. Zeinali M, Notash L, *Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for robot manipulators*. *Mech Mach Theory* 45 (1): 80–90, 2010.
35. Lee, H., Utkin, V.I. *Chattering Suppression Methods in Sliding Mode Control Systems*. *Annu Rev Control*. 2007;31(2) 179-188.
36. Qi X, *Adaptive coordinated tracking control of multiple autonomous underwater vehicles*. *Ocean Eng* 91:84–90, 2014.
37. Jun SW, Kim DW, Lee HJ, *Design of T-S fuzzymodel based controller for depth control of autonomous underwater vehicles with parametric uncertainties*. In 2011 11th international conference on control, automation and systems, ICCAS 2011, Gyeonggi-do, Korea, Republic of, 2011, pp 1682–1684,2011.
38. Medagoda L, Williams SB, *Model predictive control of an autonomous underwater vehicle in an in situ estimated water current profile*. *Oceans, Yeosu*, pp 1–8, 2012.
39. Steenson LV, Phillips AB, Turnock SR, Furlong ME, Rogers E, *Effect of measurement noise on the performance of a depth and pitch controller using the model predictive control method*. *Autonomous underwater vehicles (AUV)*, 2012 IEEE/ OES.

40. Ge S. S., Hang C. C., Lee T. H., and Zhang T. (2013): *Stable adaptive neural network control* vol. 13: Springer Science & Business Media, 2013.
41. Zhang Y., Peng P.-Y., and Jiang Z.-P. (2000): *Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping*, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 11, pp. 1347-1360.
42. Hoang, Uyen.Tu.Thi.; Le, Hai.Xuan.; Thai, Nguyen.Huu.; Pham, Hung.Van.; Nguyen, Linh. *Consistency of Control Performance in 3D Overhead Cranes under Payload Mass Uncertainty*. Electronics 2020, 9, 657.
43. Pham, Dung.Tien.; Nguyen, Thai.Van.; Le, Hai.Xuan.; Nguyen, Linh.; Thai, N.H.; Phan, T.A.; Pham, H.T.; Duong, A.H.; Bui, L.T. *Adaptive neural network based dynamic surface control for uncertain dual arm robots*. Int. J. Dyn. Control 2020, 8, 824–834.
44. Fossen T. I. and Paulsen M. J. (Year): *Adaptive feedback linearization applied to steering of ships*, in *Control Applications, 1992., First IEEE Conference on*, 1992, pp. 1088-1093.
45. Wang C. and Hill D. J. (2006): *Learning from neural control*, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 17, pp. 130-146.
46. Peng, Z.; Wang, D.; Shi, Y.; Wang, H.; Wang, W. *Containment control of networked autonomous underwater vehicles with model uncertainty and ocean disturbances guided by multiple leaders*. Inf. Sci. 2015, 316, 163–179. Nature-Inspired Algorithms for Large Scale Global Optimization.
47. Chen, M.; Tao, G.; Jiang, B. *Dynamic Surface Control Using Neural Networks for a Class of Uncertain Nonlinear Systems with Input Saturation*. IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2015, 26, 2086–2097.
48. Huang, J.Q.; Lewis, F. *Neural-network predictive control for nonlinear dynamic systems with time-delay*. IEEE Trans. Neural Netw. 2003, 14, 377–389.
49. M.S. Smith, G.J.S.Rae, D.T.Anderson, A.M. Shein, *Fuzzy logic control of an autonomous underwater vehicle*. Control Engineering Practice, Volume 2, Issue 2, April 1994, Pages 321-331.

50. A. Forouzentabar, B. Gholami, M. Azadi, (2012), “Adaptive Neural Network Control of Autonomous Underwater Vehicles”, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 67, pp 304-309.
51. W.Y.Wang, Y.G.Leu, T.T.Lee, (2002), Output Feedback Control of Nonlinear Systems Using Direct Adaptive Fuzzy – Neural Controller, *Fuzzy Set and Systems*, pp 341-358.
52. Joe, H.; Kim, M.; Yu, S. *Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances*. Nonlinear Dyn. 2014, 78, 183–196.
53. Alexander V. Inzartsev, (2008), *Underwater Vehicles*, ISBN 978-953-7619-49-7, I-Tech, Vienna, Austria.
54. Richard C. Dorf (1989) *Modern Control Systems (5th edition)*. Addison-Wesley Publishing.
55. Krstic M., Kanellakopoulos I., and Kokotovic P. V. (1995): *Nonlinear and adaptive control design* vol. 222: Wiley New York, 1995.
56. Sugeno M. (1985): *Industrial applications of fuzzy control*: Elsevier Science Inc., 1985.
57. Chen, M., Tao, G., & Jiang, B. (2014). *Dynamic surface control using neural networks for a class of uncertain nonlinear systems with input saturation*. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 26(9), 2086-2097.
58. Chen, M., Tao, G., & Jiang, B. (2014). *Dynamic surface control using neural networks for a class of uncertain nonlinear systems with input saturation*. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 26(9), 2086-2097.
59. Huang, J. Q., & Lewis, F. L. (2003). *Neural-network predictive control for nonlinear dynamic systems with time-delay*. IEEE Transactions on Neural Networks, 14(2), 377-389.
60. Fang, K., Fang, H., Zhang, J., Yao, J., & Li, J. (2021). *Neural adaptive output feedback tracking control of underactuated AUVs*. Ocean Engineering, 234, 109211.

61. Joe, H., Kim, M., & Yu, S. C. *Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances*. Nonlinear Dynamics, 78(1), 183-196, 2014.
62. Qian D., Yi J., and Zhao D: *Hierarchical sliding mode control for a class of SIMO under-actuated systems*, Control and Cybernetics, vol. 37, p. 159., 2008
63. Qian D., Yi J., and Zhao D, *Hierarchical sliding mode control for a class of SIMO under-actuated systems*, Control and Cybernetics, vol. 37, p. 159, 2008.
64. Wang W., Yi J., Zhao D., and Liu D, *Design of a stable sliding-mode controller for a class of second-order underactuated systems*, IEE Proceedings-Control Theory and Applications, vol. 151, pp. 683-690., 2004
65. Sun, B., Zhu, D., Li, W. *An Integrated Backstepping and Sliding Mode Tracking Control Algorithm for Unmanned Underwater Vehicles*. 2012; (September) 3-5.
66. Zeinali M, Notash L, *Adaptive sliding mode control with uncertainty estimator for robot manipulators*. Mech Mach Theory 45 (1): 80–90, 2010.
67. Qi X, *Adaptive coordinated tracking control of multiple autonomous underwater vehicles*. Ocean Eng 91:84–90, 2014.
68. Gupta M. M., Rao D. H., and Council I. N. N., *Neuro-control Systems: Theory and Applications*: IEEE Press, 1994.
69. Yeşildirek A. and Lewis F. L, *Feedback linearization using neural networks*, Automatica, vol. 31, pp. 1659-1664., 1995.
70. Zhang Y., Peng P.-Y., and Jiang Z.-P., *Stable neural controller design for unknown nonlinear systems using backstepping*, IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 11, pp. 1347-1360., 2000.
71. Hoang, U.T.T.; Le, H.X.; Thai, N.H.; Pham, H.V.; Nguyen, L. *Consistency of Control Performance in 3D Overhead Cranes under Payload Mass Uncertainty*. Electronics 2020, 9, 657.
72. Pham, D.T.; Nguyen, T.V.; Le, H.X.; Nguyen, L.; Thai, N.H.; Phan, T.A.; Pham, H.T.; Duong, A.H.; Bui, L.T. *Adaptive neural network based dynamic surface control for uncertain dual arm robots*. Int. J. Dyn. Control 2020, 8, 824–834.

73. Fossen T. I. and Paulsen M. J. (Year): *Adaptive feedback linearization applied to steering of ships*, in *Control Applications, 1992., First IEEE Conference on*, 1992, pp. 1088-1093.
74. Peng, Z.; Wang, D.; Shi, Y.; Wang, H.; Wang, W. *Containment control of networked autonomous underwater vehicles with model uncertainty and ocean disturbances guided by multiple leaders*. Inf. Sci. 2015, 316, 163–179. Nature-Inspired Algorithms for Large Scale Global Optimization.
75. Chen, M.; Tao, G.; Jiang, B. *Dynamic Surface Control Using Neural Networks for a Class of Uncertain Nonlinear Systems with Input Saturation*. IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst. 2015, 26, 2086–2097.
76. A. Forouzentabar, B. Gholami, M. Azadi, *Adaptive Neural Network Control of Autonomous Underwater Vehicles*, World Academy of Science, Engineering and Technology 67, pp 304-309., 2012.
77. W.Y.Wang, Y.G.Leu, T.T.Lee, *Output Feedback Control of Nonlinear Systems Using Direct Adaptive Fuzzy – Neural Controller*, Fuzzy Set and Systems, pp 341-358., 2002.

## PHỤ LỤC 1

### Khai báo Mô hình đối tượng AUV trong m-file

```
function [u1, u2] = fcn(n1, q1, n2, q2, d_alpha1,
d_alpha2, t)
plotfunction [u1,u2]
= fcn(n1,q1,n2,q2,d_alpha1,d_alpha2,t)
u = q1(1);
v = q1(2);
w = q2(1);
r = q2(2);
cosi = n2(2);
m = 18.5;
xg = 0.15;
yg = 0.15;
lz = 1.57;
Xu = 6.83e-6;
Xu1 = 6.53;
Xuu = -0.58;
Xw = -1.13e-6;
Yv1 = 0.08;
Yv = -0.85;
Yr = -1.03;
Yvv = -0.62;
Zw1 = 4.57;
Zu = 0.32;
Zw = -0.32e-6;
Zou = 0;
Zww = 1.15e-6;
Nv = 0.32;
Nr = -2.15;
Nr1 = -12.32;
Nrr = 0.5e-6;
c1 = diag([0.15,0.12]);
```

```

c2 = diag([90,90]);
c3 = diag([0.2,0.2]);
c4 = diag([0.1,0.1]);
n1d = [8 3]';
n2d = [-8 0]';
n1d_dot = [0 0]';
n2d_dot = [0 0]';
m11 = m + Xu; m12 = 0; m13 = Xw; m16 = -m*yg;
m21 = 0; m22 = m + Yv; m23 = 0; m26 = Yr + m*xg;
m31 = Zu; m32 = 0; m33 = m + Zw; m36 = 0;
m61 = -m*yg; m62 = m*xg + Nv; m63 = 0; m66 = lz + Nr;
M11 = [m11 m12;
        m21 m22];
M12 = [m13 m16;
        m23 m26];
M21 = [m31 m32;
        m61 m62];
M22 = [m33 m36;
        m63 m66];
a1 = Xu*u + Xw*w;
a2 = Yv*v + Yr*r;
c11 = 0; c12 = -m*r; c13 = 0; c16 = -m*xg*r - a2;
c21 = m*r; c22 = 0; c23 = 0; c26 = -m*yg*r + a1;
c31 = 0; c32 = 0; c33 = 0; c36 = 0;
c61 = m*xg*r + a2; c62 = m*yg*r - a1; c63 = 0; c66 = 0;
d11 = Xu1 + Xuu*abs(u);
d22 = Yv1 + Yvv*abs(v);
d31 = Zou; d33 = Zw1 + Zww*abs(w);
d66 = Nr1 + Nrr*abs(r);
C11 = [(c11+d11) c12;
        c21 (c22+d22)];
C12 = [c13 c16;
        c23 c26];

```

```

C21 = [(c31+d31) c32;
        c61 c62];
C22 = [(c33+d33) c36;
        c63 (c66+d66)];
j11 = cos(cosi); j12 = -sin(cosi);
j21 = sin(cosi); j22 = cos(cosi);
J11 = [j11 j12; j21 j22];
J22 = [1 0; 0 1];
M = M11 - M12*(M22^(-1))*M21;
C1 = C11 - M12*(M22^(-1))*C21;
C2 = C12 - M12*(M22^(-1))*C22;
z1 = n1 - n1d;
alpha1 = (J11^(-1))*(-c1*z1 + n1d_dot);
z2 = q1 - alpha1 - n1d_dot;
z3 = n2 - n2d;
alpha2 = (J22^(-1))*(-c3*z3 + n2d_dot);
z4 = q2 - alpha2 - n2d_dot;
f1 = (M^(-1))*(-C1*q1 - C2*q2);
g1 = M^(-1);
f2 = (M22^(-1))*((M21*(M^(-1))*(C1*q1 + C2*q2)) -
C21*q1 - C22*q2);
g2 = (M22^(-1))*(-M21)*(M^(-1));
u1 = (g1^(-1))*(-c2*z2-J11'*z1-(f1-d_alpha1));
u2 = (g2^(-1))*(-c4*z4-J22'*z3-(f2-d_alpha2));

```

### **Khai báo thông số bộ điều khiển trong m-file**

```

function [y1,y2,y3,y4,F2,T,dis] = plant(u1,alpha)
t1 = u1(1:2);
q1 = u1(3:4);
n2 = u1(5:6);
q2 = u1(7:8);
t2 = u1(9:10);
dis = u1(11:12);
u = q1(1);

```

```

v = q1(2);
w = q2(1);
r = q2(2);
cosi = n2(2);
beta = 0.05;
m = 18.5;
xg = 0.15;
yg = 0.15;
lz = 1.57;
Xu = 6.83e-6;
Xu1 = 6.53;
Xuu = -0.58;
Xw = -1.13e-6;
Yv1 = 0.08;
Yv = -0.85;
Yr = -1.03;
Yvv = -0.62;
Zw1 = 4.57;
Zu = 0.32;
Zw = -0.32e-6;
Zou = 0;
Zww = 1.15e-6;
Nv = 0.32;
Nr = -2.15;
Nr1 = -12.32;
Nrr = 0.5e-6;
m11 = m + Xu; m12 = 0; m13 = Xw; m16 = -m*yg;
m21 = 0; m22 = m + Yv; m23 = 0; m26 = Yr + m*xg;
m31 = Zu; m32 = 0; m33 = m + Zw; m36 = 0;
m61 = -m*yg; m62 = m*xg + Nv; m63 = 0; m66 = lz + Nr;
M11 = [m11 m12;
        m21 m22];
M12 = [m13 m16;
        m23 m26];
M21 = [m31 m32;

```

```

        m61 m62];
M22 = [m33 m36;
        m63 m66];
a1 = Xu*u + Xw*w;
a2 = Yv*v + Yr*r;
c11 = 0; c12 = -m*r; c13 = 0; c16 = -m*xg*r - a2;
c21 = m*r; c22 = 0; c23 = 0; c26 = -m*yg*r + a1;
c31 = 0; c32 = 0; c33 = 0; c36 = 0;
c61 = m*xg*r + a2; c62 = m*yg*r - a1; c63 = 0; c66 = 0;
d11 = Xu1 + Xuu*abs(u);
d22 = Yv1 + Yvv*abs(v);
d31 = Zou; d33 = Zw1 + Zww*abs(w);
d66 = Nr1 + Nrr*abs(r);
C11 = [(c11+d11) c12;
        c21 (c22+d22)];
C12 = [c13 c16;
        c23 c26];
C21 = [(c31+d31) c32;
        c61 c62];
C22 = [(c33+d33) c36;
        c63 (c66+d66)];
j11 = cos(cosi); j12 = -sin(cosi);
j21 = sin(cosi); j22 = cos(cosi);
J11 = [j11 j12;
        j21 j22];
J22 = [1 0; 0 1];
M = M11 - M12*(M22^(-1))*M21;
C1 = C11 - M12*(M22^(-1))*C21;
C2 = C12 - M12*(M22^(-1))*C22;
f1 = (M^(-1))*(-C1*q1 - C2*q2);
g1 = M^(-1);
        f2 = (M22^(-1))*((M21*(M^(-1))*(C1*q1 + C2*q2)) -
C21*q1 - C22*q2);
g2 = (M22^(-1))*(-M21)*(M^(-1));
t = (alpha*t1 + beta*t2) + dis;

```

```

y1 = J11*q1;
y2 = f1 + g1*t;
y3 = J22*q2;
y4 = f2 + g2*t;
F2 = f2;
T = t;
end

```

### **Cài đặt tham số đầu vào trong m-file**

```

function a1 = fcn(n1,n2)
cosi = n2(2);
j11 = cos(cosi); j12 = -sin(cosi);
j21 = sin(cosi); j22 = cos(cosi);
J11 = [j11 j12;
        j21 j22];
c1 = diag([0.15,0.12]);
n1d = [8 3]';
n1d_dot = [0 0]';
z1 = n1 - n1d;
a1 = (J11^(-1))*(-c1*z1 + n1d_dot);
function a2 = fcn(n2)
J22 = [1 0;
        0 1];
c3 = diag([2,2]);
n2d = [-8 0]';
n2d_dot = [0 0]';

z3 = n2 - n2d;
a2 = (J22^(-1))*(-c3*z3 + n2d_dot);

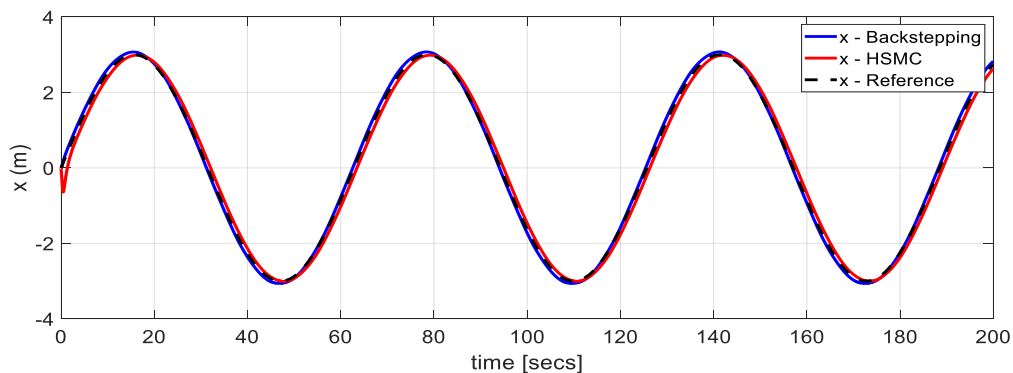
```

## PHỤ LỤC 2

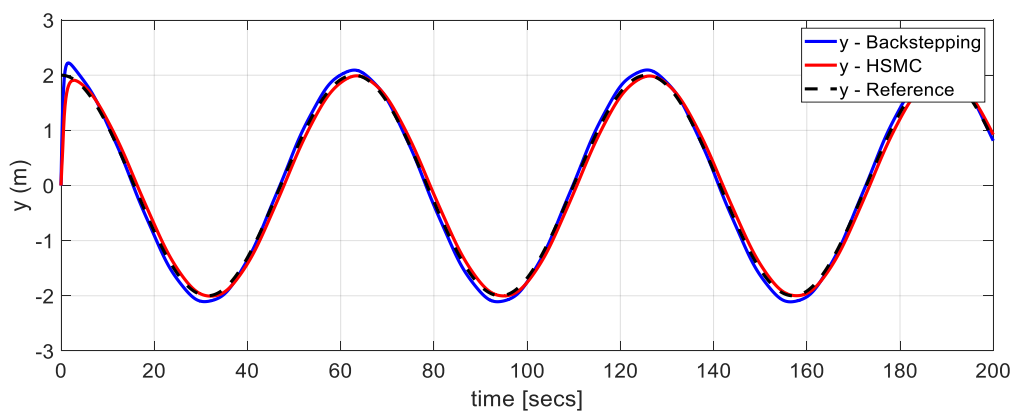
Trường hợp 1: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian với các giá trị đặt như sau:

$\eta_{1d} = [3\sin(0.01t) \quad 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-10 \quad 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [10\sin(0.01t) \quad 5\cos(0.01t)]^T$

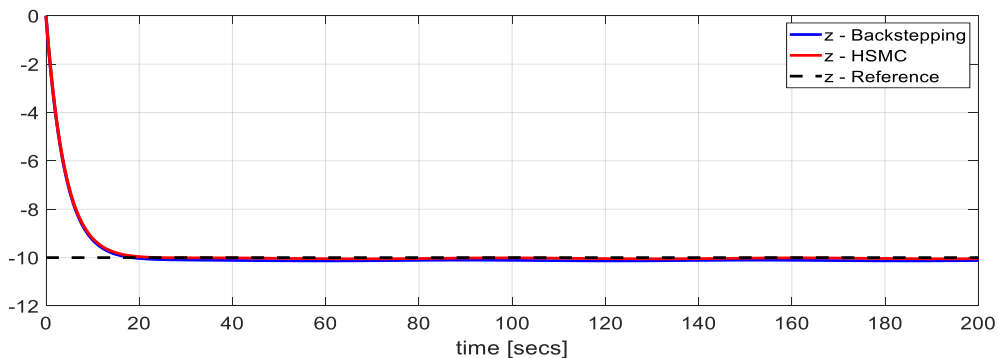
Đáp ứng quỹ đạo theo



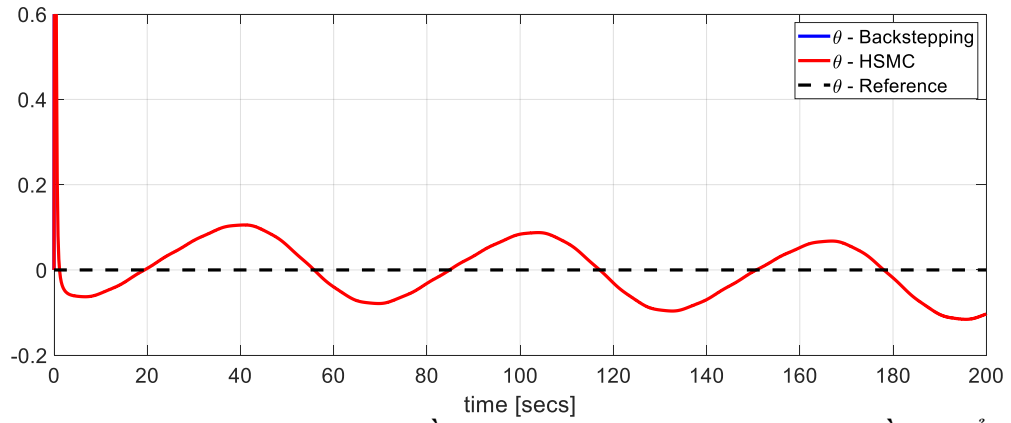
Hình PL2.1. Đáp ứng theo trục  $x$  của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 1



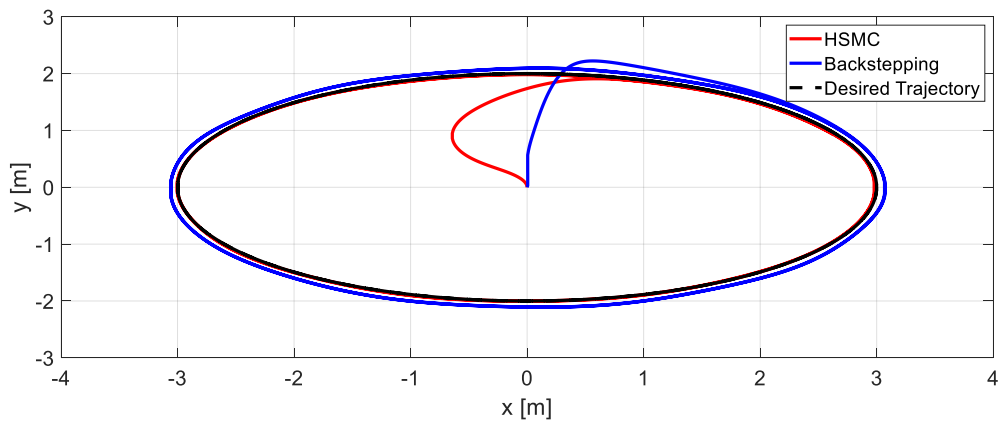
Hình PL2.2. Đáp ứng theo trục  $y$  của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 1



Hình PL2.3. Đáp ứng theo trục  $z$  của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 1

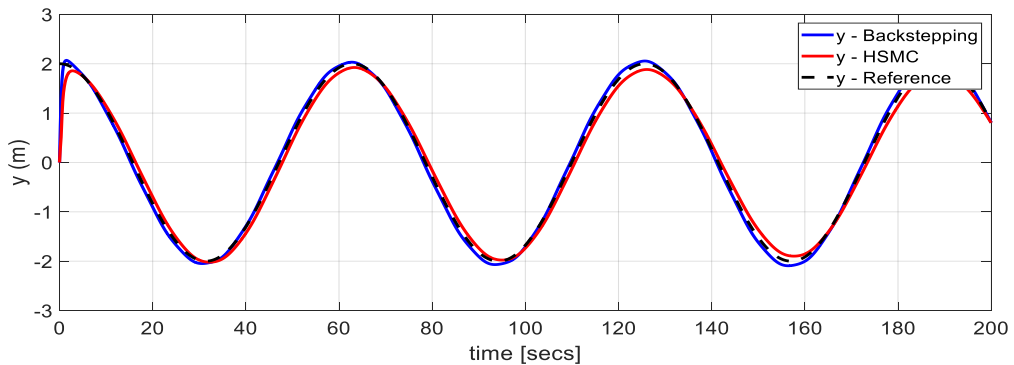


Hình PL2.4. Đáp ứng góc điều hướng của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 1

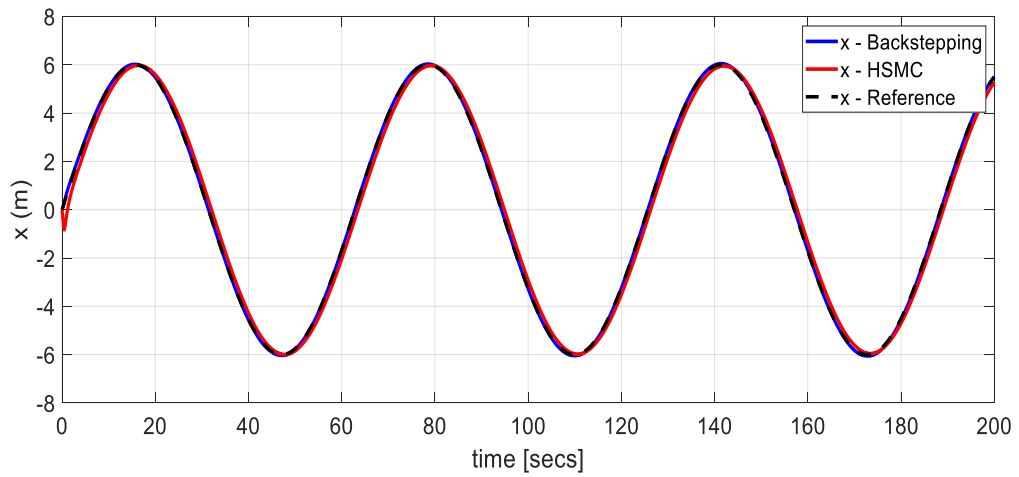


Hình PL2.5. Quỹ đạo theo trục x, y của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 1

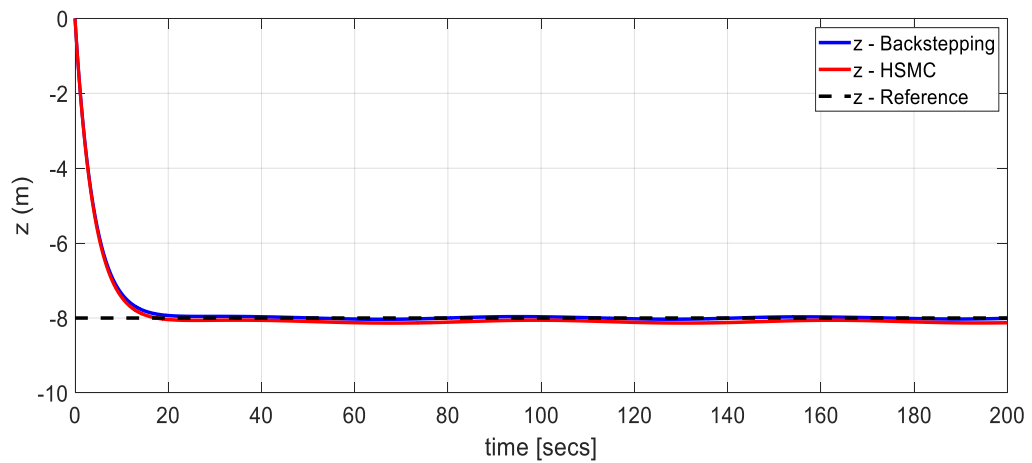
Trường hợp 2: Thiết bị AUV lặn xuống độ sâu -10 (m) tính từ mặt nước và đáp ứng quỹ đạo điều hòa theo thời gian với các giá trị đặt như sau:  $\eta_{1d} = [6\sin(0.01t) \quad 2\cos(0.01t)]^T$  và  $\eta_{2d} = [-8 \quad 0]^T$ . Thiết bị cũng chịu tác động nhiễu điều hòa vào tín hiệu điều khiển có dạng:  $\Delta = [10\sin(0.01t) \quad 5\cos(0.01t)]^T$



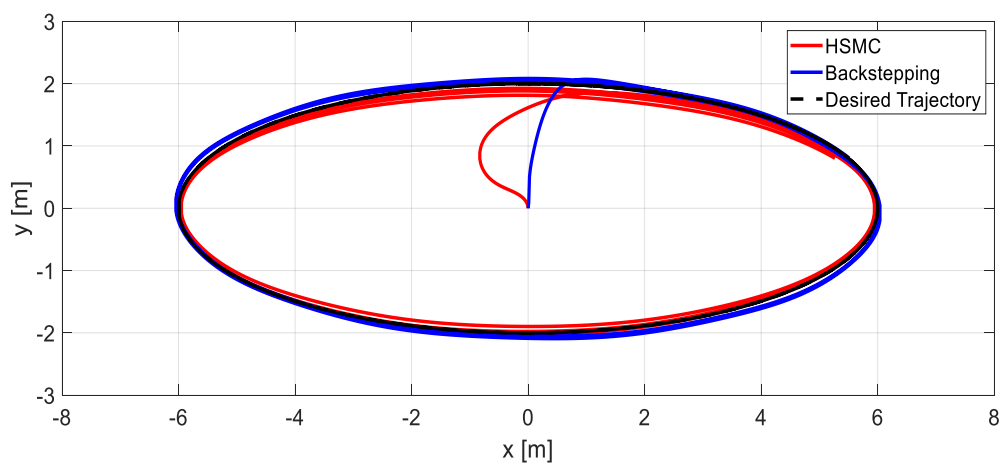
Hình PL2.6. Đáp ứng theo trục y của AUV với 2 bộ điều khiển Backstepping và HSMC trường hợp 2



Hình PL2.7. Đáp ứng theo trục  $x$  của AUV với 2 bộ điều khiển  
Backstepping và HSMC trường hợp 2



Hình PL2.8. Đáp ứng theo trục  $z$  của AUV với 2 bộ điều khiển  
Backstepping và HSMC trường hợp 2



Hình PL2.9. Quỹ đạo theo trục  $x, y$  của AUV với 2 bộ điều khiển  
Backstepping và HSMC trường hợp 2