

## Nghiên cứu mô phỏng hệ tái tạo dao động của tàu biển sử dụng robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart

Hà Huy Hưng<sup>1\*</sup>, Hoàng Quang Chính<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Anh<sup>1</sup>,  
Trần Trung Kiên<sup>2</sup>, Lê Công Khanh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự;

<sup>2</sup>Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

\*Email: hahuyhung@lqdtu.edu.vn

Nhận bài: 28/02/2022; Hoàn thiện: 25/3/2022; Chấp nhận đăng: 05/4/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.80.2022.156-167>

### TÓM TẮT

*Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình tái tạo lại dao động của tàu biển trên cơ sở robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart. Dữ liệu dao động tại trọng tâm tàu biển được tính toán bởi phần mềm mô phỏng sẽ làm đầu vào của mô hình. Hệ điều khiển tái tạo sử dụng bộ điều khiển PID đơn giản để điều khiển bám theo quỹ đạo đầu vào. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink đã thể hiện việc tái tạo lại dao động tàu biển với sai số cho phép.*

**Từ khoá:** Robot song song; Động học; Tái tạo dao động tàu biển; Mô phỏng dao động

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dao động tàu biển dưới tác động sóng biển là một trong những loại dao động phức tạp. Việc nghiên cứu dao động tàu [5, 13, 15] đóng vai trò quan trọng trong thiết kế tàu, lắp đặt, điều khiển ổn định các hệ thống trên tàu cũng như mô phỏng lái tàu [16, 17]. Do dao động của tàu là loại dao động phức tạp, nếu thực hiện đo thực tế sẽ dẫn đến tốn kém cả tiền của và thời gian mà khó có thể bao phủ được hết các loại tàu và các dạng cấp sóng khác nhau. Chính vì vậy, việc nghiên cứu tái tạo lại dao động tàu trên mô hình mô phỏng hoặc mô hình bán tự nhiên có ý nghĩa lớn trong các bài toán mô phỏng lái, đặc biệt trong các bài toán nghiên cứu hệ thống điều khiển ổn định thiết bị đặt lên tàu.

Robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart có cấu trúc gồm một khâu công tác (để chuyển động) liên kết với đế cố định thông qua sáu chân bởi các khớp cầu hoặc khớp các đăng. Robot có 6 chân, các chân được dẫn động bằng các động cơ điện hoặc xi lanh thủy lực. Cấu trúc của robot cho phép tạo ra các chuyển động theo 6 bậc tự do cho khâu công tác bằng cách thay đổi chiều dài của từng chân robot. Nhờ vậy, robot song song có thể tạo ra dao động như các dao động thực tế của các phương tiện di chuyển như tàu biển, ô tô, máy bay,... Vì vậy, robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart thường được ứng dụng trong các hệ mô phỏng bay, mô phỏng lái tàu thủy [16].

Trong thực tế hiện nay, những bài toán tính toán và tái tạo dao động tàu biển chủ yếu được tính toán dựa trên mô hình 2D [13], hoặc mô hình 3D [5, 15, 17] và đa phần sử dụng trong các mô phỏng chuyển động của tàu biển phục vụ cho quá trình huấn luyện lái tàu [15, 17]. Các dao động được tái tạo trong các hệ thống mô phỏng lái thường là các dao động cho ở dạng hàm điều hòa, các phần mềm mô phỏng cho phép thay đổi biên độ và chu kỳ dao động. Do dao động của sóng biển trên thực tế rất phức tạp, nên việc mô hình hóa ở dạng dao động điều hòa là không phù hợp, mà cần mô hình hóa dựa trên phổ năng lượng và phương truyền sóng. Từ dữ liệu dao động của sóng ở dạng số, tính được dữ liệu dao động của tàu cũng ở dạng số là đầu vào để đưa vào hệ tái tạo dao động của tàu. Nội dung chính mà bài báo sẽ trình bày xây dựng mô hình mô phỏng hệ tái tạo dao động của tàu sử dụng mô hình robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart.

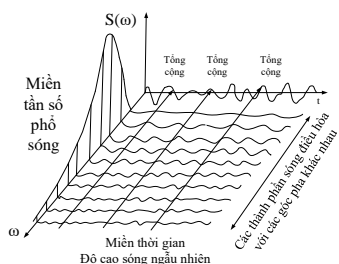
Các nội dung trình bày tiếp theo của bài báo gồm: mô hình sóng biển, mô hình chuyển động của tàu biển, xây dựng hệ tái tạo dao động tàu biển, nghiên cứu mô phỏng và cuối cùng là nhận xét, đánh giá kết quả mô phỏng.

## 2. DAO ĐỘNG CỦA TÀU TRÊN SÓNG BIỂN

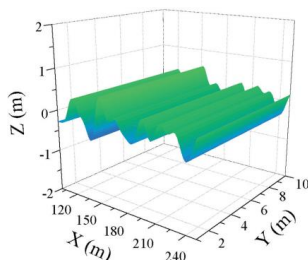
### 2.1. Mô hình sóng biển

Sóng biển được hình thành do sự tác động của gió, lực hấp dẫn thiên văn và các phương tiện nổi như tàu. Chúng thường được mô tả bằng chiều cao, chiều dài và chu kỳ sóng [2]. Chiều cao sóng được xác định bằng độ chênh lệch thẳng đứng giữa cao độ của đỉnh và đáy lân cận. Trong phạm vi bài báo này giới thiệu sóng biển hình thành do sự hiện diện của gió.

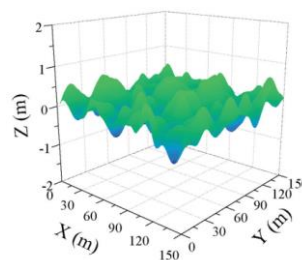
Sóng biển có thể được hiểu là chồng chất của nhiều sóng điều hòa, mỗi sóng có biên độ, tần số và pha riêng [4], như có thể thấy trong hình 1. Có hai mô hình chính để mô tả sóng biển [2]: sóng một chiều (long-crested sea) hình 2 và sóng đa chiều (Short-crested sea) hình 3. Theo vận tốc gió, sóng biển được chia thành 10 cấp sóng từ 0÷9, tương ứng với biên độ dao động của sóng [2].



Hình 1. Sự xếp chồng của sóng và phổ sóng.



Hình 2. Sóng một chiều (Long-crested sea).



Hình 3. Sóng đa chiều (Short-crested sea).

Có nhiều mô hình toán học mô tả dao động của sóng biển khác nhau như mô hình sóng dựa trên các lý thuyết sóng, mô hình sóng dựa trên phổ năng lượng và phương truyền sóng. Các phương trình dao động của sóng biển dựa trên các lý thuyết sóng như lý thuyết sóng tuyến tính được Airy, lý thuyết sóng Stokes, lý thuyết sóng Cnoidal được trình bày trong các tài liệu [3, 10]. Mô hình sóng gần với sóng thực tế là mô hình sóng dựa trên phổ năng lượng và phương truyền sóng. Các loại phổ năng lượng sóng thông dụng như phổ năng lượng Neumann, phổ năng lượng Bretschneider, phổ năng lượng Pierson-Moskowitz, phổ năng lượng JONSWAP, phổ năng lượng Torsethaugen.

Trong khuôn khổ bài báo này, sử dụng mô hình dao động sóng một chiều để nghiên cứu dao động tàu và tái tạo dao động đó. Phương trình mô hình sóng biển [7, 9] được trình bày trong (1) dưới đây:

$$\xi(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{S(\omega_i)\Delta\omega} \cos(k_i(x_i \cos(\mu) + y_i \sin(\mu) - \omega_i t + \varepsilon_i)) \quad (1)$$

Trong đó:

- $k_i$ : Số sóng (bằng  $2\pi/\lambda$  với biên độ sâu hữu hạn và  $\omega^2/g$  với biên độ sâu vô hạn);
- $\lambda_i$ : Chiều dài sóng của thành phần sóng thứ  $i$ ;
- $\omega$ : Tần số dao động;
- $\varepsilon_i$ : Pha ngẫu nhiên của thành phần sóng thứ  $i$ ;
- $\Delta\omega$ : Sự sai lệch không đổi giữa các tần số sóng;
- $\mu$ : Góc hướng sóng.
- $S(\omega)$ : Phổ năng lượng của sóng. Trong bài báo này sử dụng phổ năng lượng Bretschneider [2] có công thức như sau:

$$S(\omega) = \frac{1.25}{4} \frac{\omega_0^4}{\omega^{-5}} H_s^2 \exp[-1.25(\omega_0/\omega)^4] \quad (2)$$

Với  $\omega_0$  là tần số tại đỉnh của phổ năng lượng sóng và  $H_s$  là chiều cao sóng trung bình (trung bình của một phần ba chiều cao các sóng cao nhất).

## 2.2. Mô hình chuyển động tàu biển

Xét tàu biển có khối lượng  $m$ , có kích thước dài, rộng cao được kí hiệu lần lượt là  $L, B, H$ . Hệ tọa độ  $G_0$  (OXYZ) cố định được gắn với trái đất. Hệ tọa độ  $G_1$  (Onvw) gắn với tàu, có gốc tọa độ tại vị trí trọng tâm, trục OX dọc theo thân tàu hướng về phía mũi tàu, trục OZ vuông góc với mặt sàn tàu (hình 4).

Các biến trạng thái khi nghiên cứu chuyển động của tàu gồm  $[x, y, z, v_u, v_v, v_w, \phi, \theta, \psi, u, v, w]^T$ .

Trong đó:

- $[x, y, z]^T$ : Vị trí của trọng tâm tàu được mô tả trong hệ tọa độ gắn với trái đất;
- $[v_u, v_v, v_w]^T$ : Vận tốc của trọng tâm tàu được mô tả trong hệ tọa độ gắn với tàu;
- $[\phi, \theta, \psi]^T$ : Các góc Euler mô tả chuyển động quay của các trục hệ tọa độ gắn với tàu theo các trục hệ tọa độ gắn với trái đất;
- $[u, v, w]^T$ : Vận tốc quay trong hệ tọa độ gắn với tàu.

Mối quan hệ và xác định các biến trạng thái được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó  $\mathbf{R}$  là ma trận quay, được xác định theo biểu thức dưới đây:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} C(\psi)C(\theta) & C(\psi)S(\theta)S(\phi) - C(\phi)S(\psi) & S(\psi)S(\phi) + C(\phi)C(\psi)S(\theta) \\ C(\theta)S(\psi) & C(\psi)C(\phi) + S(\psi)S(\theta)S(\phi) & C(\phi)S(\psi)S(\theta) - C(\psi)S(\phi) \\ -S(\theta) & C(\theta)S(\phi) & C(\theta)C(\phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Với:  $C \triangleq \cos, S \triangleq \sin$

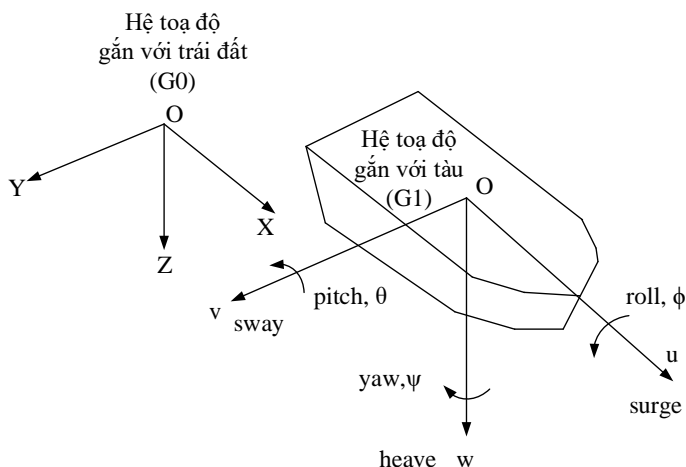
Vận tốc của trọng tâm tàu được xác định như sau [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_u \\ \dot{v}_v \\ \dot{v}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_{d,u}A_u\rho}{m}v_u + \frac{1}{m}F_u \\ -\frac{Cv_{d,v}}{m_v} \\ -\frac{C_{d,w}A_w\rho}{m}v_w + \frac{1}{m}F_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó:

- $C_d$ : Hằng số tắt dần của vận tốc;
- $[A_u, A_v, A_w]$ : Các mặt cắt ngang dọc theo các trục  $u, v, w$  [ $m^2$ ];
- $\rho$ : Mật độ của nước, bằng 998 [ $kg/m^3$ ];
- $m$ : Khối lượng của tàu.
- $F_u, F_v, F_w$ : Tổng lực nổi và trọng lực trong hệ tọa độ gắn với tàu.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$



Hình 4. Mô hình tàu và các hệ tọa độ.

Ma trận chuyển  $T$  được xác định như sau:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \tan(\theta) & \cos(\phi) \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \cos(\phi) \sec(\theta) & \cos(\phi) \sec(\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Gia tốc quay trong hệ tọa độ gắn với tàu được xác định như sau [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_u}{I_u} u + \frac{1}{I_u} \tau_u \\ -\frac{B_v}{I_v} v + \frac{1}{I_u} \tau_v \\ -\frac{B_w}{I_w} u + \frac{1}{I_w} \tau_w \end{bmatrix}$$

Ở đây:

- $B_u, B_v, B_w$ : Hệ số ma sát nhớt xoắn [N.s/m];
- $I_u, I_v, I_w$ : Mô men quán tính của tàu theo các trục  $Ou, Ov, Ow$  của hệ tọa độ gắn với tàu;
- $\tau_u, \tau_v, \tau_w$ : Tổng mô men ngoại lực tác dụng lên thân tàu.

Trong bài báo này, để đơn giản chúng ta giả sử tàu ở vị trí thả neo, chân vịt không chuyển động, bỏ qua khối lượng thêm vào tàu, lực của gió, các lực tác động lên tàu gồm lực đẩy của nước (lực thủy tĩnh), trọng lực, lực Coriolis và lực quán tính hướng tâm. Do đó, phương trình chuyển động của tàu trong [2] có thể được viết dưới dạng đơn giản như sau:

$$M_{RB} \dot{\mathbf{v}} + (C_{RB} + D_v) \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (8)$$

Trong đó:

- $\mathbf{v} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ : Véc tơ vận tốc của hệ tọa độ G1 so với hệ tọa độ G0;
- $M_{RB}$ : Ma trận khối lượng và ten xơ quán tính của tàu;  $I_{G1}$  là ten xơ quán tính của tàu đối với hệ trục tọa độ G1.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_{G1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

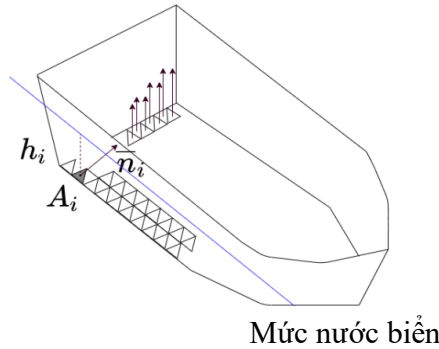
- $M_A$ : Ma trận khối lượng thêm do tàu chuyển động trong nước;
- $C_{RB}$ : Ma trận có các thành phần do lực quán tính Coriolis [18] và lực quán tính hướng tâm của tàu; Trong (10), ma trận  $S$  là toán tử sóng của một véc tơ đại số có 3 thành phần.

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) \\ -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) & -\mathbf{S}(I_{G1}\mathbf{v}_2) \end{bmatrix}_{6 \times 6}; \mathbf{S}(\mathbf{v}_1) = \begin{bmatrix} 0 & -m\dot{z} & m\dot{y} \\ m\dot{z} & 0 & -m\dot{x} \\ -m\dot{y} & m\dot{x} & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

- $\mathbf{D}_v$ : Ma trận giảm chấn ma sát nhớt tuyến tính;
  - $\mathbf{G}$ : Phản lực từ nước biển;
  - $\boldsymbol{\tau}$ : Vectơ lực và mô men ngoại lực do lực đẩy chân vịt và sóng tác động lên tàu.
- Ngoại lực gồm lực từ áp suất thủy tĩnh [2, 11] và lực chân vịt được xác định:

$$\begin{bmatrix} F_u \\ F_v \\ -F_w \end{bmatrix} = \sum_i \rho g A_i h_i \bar{n}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Ở đây:  $A_i$  - Diện tích tam giác;  $h_i$  - Độ cao tương đối của nước ở vị trí giữa tam giác;  $\bar{n}_i$  - Hướng pháp tuyến của tam giác thứ  $i$  (hình 5);  $F_c$  - Ngoại lực tác động để tàu chuyển động về phía trước.



**Hình 5.** Các tam giác chia lưới trên vỏ tàu và các vectơ pháp tuyến của nó.

Do mỗi một lực tác dụng lên thân tàu đều tạo ra mô men tương đối so với tâm trọng lực của tàu [12]. Do đó, cho một lực  $\vec{F}_i$  và cánh tay đòn  $\vec{d}_i$  trong hệ tọa độ gắn với tàu, sẽ sinh ra một mô men được xác định như sau:

$$\bar{\tau}_i = (\mathbf{R}^T \vec{d}_i) \times (\mathbf{R}^T \vec{F}_i) \quad (12)$$

Do đó, mô men ngoại lực được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} \tau_u \\ \tau_v \\ \tau_w \end{bmatrix} = \sum_i \bar{\tau}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

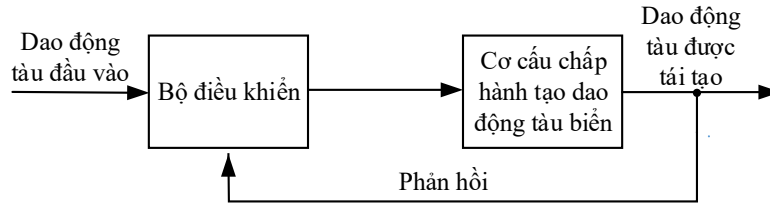
Trong đó,  $\tau_c$  sinh ra bởi lực để tạo ra góc yaw.

Mô hình sóng và mô hình chuyển động của tàu được trình bày trong mục này đã được sử dụng trong bộ công cụ mô phỏng sóng biển và mô phỏng tàu của trung tâm LINK-SIC thuộc Đại học Linköping [8]. Quá trình và kết quả mô phỏng sử dụng công cụ này được trình bày trong mục 4 dưới đây của bài báo này.

### 3. XÂY DỰNG HỆ TÁI TẠO DAO ĐỘNG TÀU BIỂN

#### 3.1. Sơ đồ khối hệ tái tạo dao động tàu biển

Trên hình 6 trình bày sơ đồ khối của Hệ tái tạo tín hiệu dao động tàu biển. Hệ này gồm hai thành phần chính: cơ cấu chấp hành tạo dao động tàu biển và bộ điều khiển. Hệ tái tạo dao động tàu biển có nguyên lý làm việc như sau: Khi trên đầu vào của hệ có các tín hiệu dao động tàu, bộ điều khiển của hệ sẽ dựa trên tín hiệu đầu vào và tín hiệu phản hồi để tạo ra các tín hiệu điều khiển cơ cấu chấp hành thực hiện dao động bám theo các tín hiệu đầu vào.

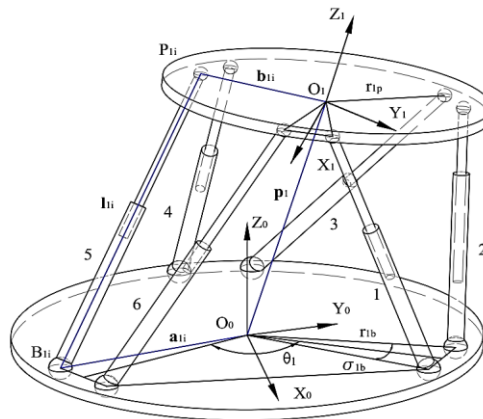


Hình 6. Sơ đồ khối hệ tái tạo dao động tàu.

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng các tín hiệu dao động của tàu từ bộ công cụ mô phỏng của trung tâm LINK-SIC với các thông tin đầu vào là vị trí và các góc Euler; Cơ cấu chấp hành sử dụng mô hình robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart [1]; Bộ điều khiển sử dụng bộ điều khiển PID. Việc giải các bài toán động học của robot song song và tính toán, thiết kế bộ điều khiển được trình bày chi tiết dưới đây.

**3.2. Mô hình động học ngược robot song song**

Sơ đồ động học của robot được thể hiện trên hình 7. Đế cố định, khâu công tác của robot được kí hiệu lần lượt là  $\{B_1\}, \{P_1\}$ . Tâm các khớp trên đế  $\{B_1\}$  và tâm các khớp trên khâu  $\{P_1\}$  kí hiệu lần lượt là  $B_{1i}, P_{1i} (i=1..6)$ . Hệ tọa độ cố định  $O_0X_0Y_0Z_0$  gắn tại tâm của đế  $\{B_1\}$ , trục  $O_0Z_0$  hướng lên trên, trục  $O_0X_0$  đi qua trung điểm của đường nối giữa hai khớp  $B_{11}$  và  $B_{16}$ . Hệ tọa độ  $O_1X_1Y_1Z_1$  gắn vào tâm tại khâu  $\{P_1\}$ , có trục  $O_1Z_1$  hướng lên trên, trục  $O_1X_1$  đi qua trung điểm của đường nối giữa  $P_{11}$  và  $P_{16}$ .



Hình 7. Sơ đồ động học robot song song

Robot song song dạng Stewart-Gough có các khớp nối nằm trên đế cố định hoặc khâu công tác  $\{B_1\}$  được bố trí thành từng cặp đối xứng nhau và cùng nằm trên một vòng tròn. Góc giữa  $O_0B_{11}$  và  $O_0B_{13}$  bằng  $120^\circ$ , góc giữa  $O_1P_{11}$  và  $O_1P_{13}$  bằng  $120^\circ$ . Gọi bán kính vòng tròn tạo bởi các khớp nối trên mặt  $\{B_1\}$  và bán kính vòng tròn tạo bởi các khớp nối trên mặt  $\{P_1\}$  lần lượt là  $r_{1b}, r_{1p}$ . Góc  $B_{11}O_0B_{12}$  là  $\sigma_{1b}$ . Góc  $P_{11}O_1P_{12}$  là  $\sigma_{1p}$ . Góc giữa trục  $O_0X_0$  và véc tơ  $a_{1i}$  là  $\xi_{1i}$ , góc giữa trục  $O_1X_1$  và véc tơ  $b_{1i}$  là  $\zeta_{1i}$ . Khoảng cách từ tâm đế  $\{B_1\}$  và khâu  $\{P_1\}$  đến các tâm khớp thuộc nó tương ứng lần lượt là  $a_{1i}, b_{1i}$ . Độ dài các chân lần lượt là  $l_{1i}, i = 1, \dots, 6$ .

$$\begin{aligned} \xi_{1i} &= \frac{\theta_1}{2}i - \frac{\sigma_{1b}}{2}; \zeta_{1i} = \frac{\theta_1}{2}i - \frac{\sigma_{1p}}{2}; i = 1, 3, 5 \\ \xi_{1i} &= \xi_{1i-1} + \sigma_{1b}; \zeta_{1i} = \zeta_{1i-1} + \sigma_{1p}; i = 2, 4, 6 \end{aligned} \tag{14}$$

Vị trí tâm các khớp trong các hệ tọa độ tương ứng gắn với đế và khâu công tác được xác định như sau:

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{a}_{1i} &= [r_{1b} \cos(\xi_{1i}) \quad r_{1b} \sin(\xi_{1i}) \quad 0]^T \\ {}^1\mathbf{b}_{1i} &= [r_{1p} \cos(\zeta_{1i}) \quad r_{1p} \sin(\zeta_{1i}) \quad 0]^T \end{aligned} \quad (15)$$

Tọa độ suy rộng của robot trong không gian khớp gồm các biến chiều dài của 6 chân:

$$\mathbf{q}_1 = [l_{11} \quad l_{12} \quad l_{13} \quad l_{14} \quad l_{15} \quad l_{16}]^T = [\mathbf{l}_{1i}]^T \quad (16)$$

Vị trí và hướng của khâu công tác được xác định bởi véc tơ:

$$\mathbf{p}_1 = [x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad \alpha_1 \quad \beta_1 \quad \gamma_1]^T \quad (17)$$

Ma trận quay từ hệ tọa độ  $O_1$  về hệ tọa độ  $O_0$  ứng với các góc roll, pitch, yaw  $\gamma, \beta, \alpha$  là:

$$\mathbf{R}_{01} = \begin{bmatrix} C(\gamma_1)C(\beta_1) & C(\gamma_1)S(\beta_1)S(\alpha_1) - C(\alpha_1)S(\gamma_1) & S(\gamma_1)S(\alpha_1) + C(\alpha_1)C(\gamma_1)S(\beta_1) \\ C(\beta_1)S(\gamma_1) & C(\gamma_1)C(\alpha_1) + S(\gamma_1)S(\beta_1)S(\alpha_1) & C(\alpha_1)S(\gamma_1)S(\beta_1) - C(\gamma_1)S(\alpha_1) \\ -S(\beta_1) & C(\beta_1)S(\alpha_1) & C(\beta_1)C(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\triangleq \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

Với:  $C \triangleq \cos, S \triangleq \sin$ .

Vector chiều dài của một chân robot được tính như sau:

$$\vec{l}_{1i} = \vec{p}_1 + \vec{b}_{1i} - \vec{a}_{1i} \quad (19)$$

Chiếu các đẳng thức véc tơ xuống hệ tọa độ  $O_0$ :

$${}^0\mathbf{l}_{1i} = {}^0\mathbf{p}_1 - {}^0\mathbf{a}_{1i} + {}^0\mathbf{b}_{1i} = {}^0\mathbf{p}_1 - {}^0\mathbf{a}_{1i} + \mathbf{R}_{01} {}^1\mathbf{b}_{1i} \quad (20)$$

Hay:

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{l}_{1i} &= \begin{bmatrix} l_{1ix} \\ l_{1iy} \\ l_{1iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1ix} \\ p_{1iy} \\ p_{1iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 - b_{1ix} \\ y_1 - b_{1iy} \\ z_1 - b_{1iz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m_{11}p_{1ix} + m_{12}p_{1iy} \\ m_{21}p_{1ix} + m_{22}p_{1iy} \\ m_{31}p_{1ix} + m_{32}p_{1iy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 - b_{1ix} \\ y_1 - b_{1iy} \\ z_1 - b_{1iz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

Ở trên chú ý rằng,  $p_{1iz}$  bằng 0. Độ dài một chân của robot được tính như sau:

$$\begin{aligned} l_{1i}^2 &= x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 + r_{1p}^2 + r_{1b}^2 + 2(m_{11}b_{1ix} + m_{12}b_{1iy})(x_1 - a_{1ix}) \\ &+ 2(m_{21}b_{1ix} + m_{22}b_{1iy})(x_1 - a_{1iy}) + 2(m_{31}b_{1ix} + m_{32}b_{1iy})z_1 - 2(x_1a_{1ix} + y_1a_{1iy}) \end{aligned} \quad (22)$$

Dựa vào các phương trình (21), (22) sẽ tính được độ dài các chân theo các biến trong không gian công tác.

### 3.3. Thiết kế bộ điều khiển

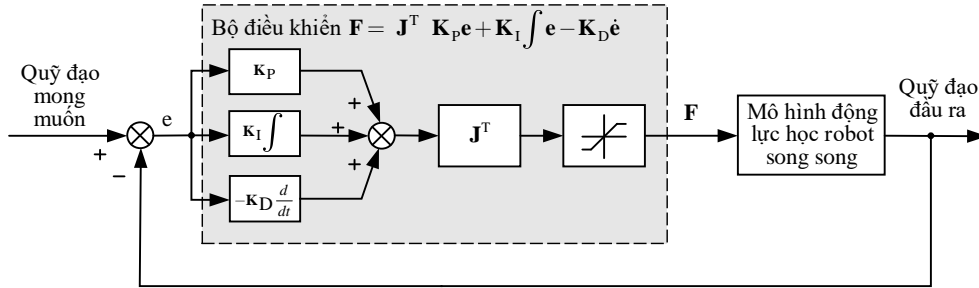
Mục tiêu cơ bản của bộ điều khiển cho hệ tái tạo dao động tàu là dựa trên quỹ đạo mong muốn của khâu công tác  $\{P_1\}$  gồm vị trí và hướng sẽ tính toán thành quỹ đạo mong muốn tương ứng ở chân bằng cách sử dụng động học ngược. Cuối cùng, sử dụng một bộ điều khiển cho mỗi chân để điều khiển cho từng chân bám theo quỹ đạo mong muốn đó. Bằng cách này, dao động nhận được của khâu công tác bám theo dao động đặt, dao động của tàu biển trên sóng.

Sử dụng mô hình động lực học robot song song trong [6] và được thể hiện trong biểu thức (23) như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{h}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (23)$$

Trong đó:  $\mathbf{M}(\mathbf{X})$  là ma trận quán tính;  $\mathbf{h}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})$  là ma trận bao gồm các thành phần phi tuyến gồm lực Coriolis [18], lực hướng tâm và lực trọng;  $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_6]^T$  vectơ lực các chân tương ứng;  $\mathbf{J}$  là ma trận Jacobian.

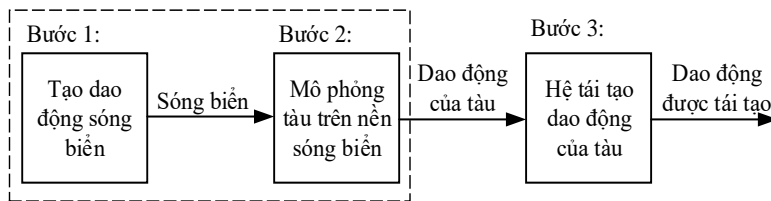
Trong bài báo này, thiết kế bộ điều khiển PID đơn giản với đầu vào là sai số vị trí và vận tốc sai số, đầu ra là vector lực trên các chân. Sơ đồ điều khiển của hệ thống được trình bày trên hình 8.



Hình 8. Sơ đồ điều khiển của hệ tái tạo dao động tàu.

#### 4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

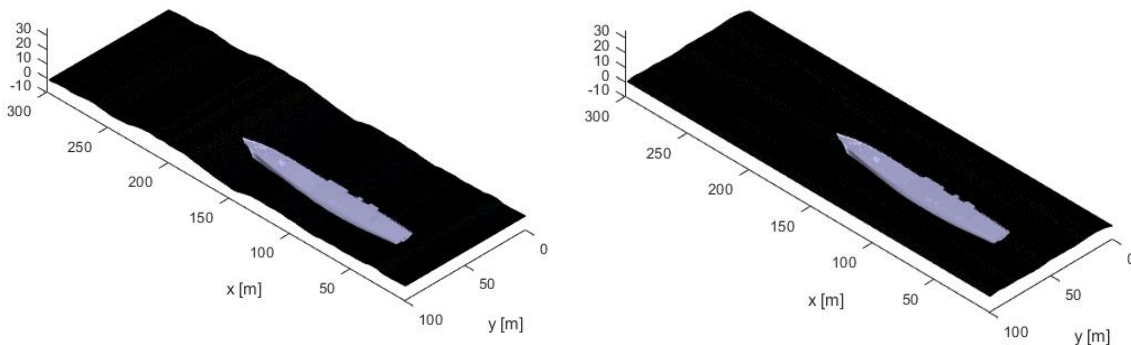
Trong phần này sẽ trình bày các nội dung mô phỏng gồm mô phỏng sóng biển, mô phỏng dao động tàu. Các tín hiệu mô phỏng dao động tàu biển sẽ được đưa vào Hệ tái tạo dao động. Trình tự các bước thực hiện sẽ được minh họa trên hình 9 dưới đây.



Hình 9. Trình tự các bước mô phỏng.

##### 4.1. Mô phỏng sóng biển

Trong mô phỏng sóng biển, để không mất tính tổng quát cũng như khối lượng mô phỏng, trong bài báo này tiến hành 02 mô phỏng sóng cấp 6 loại sóng một chiều với mô hình sóng (1) và phổ (2) theo 2 hướng so với tàu gồm: sóng đi vào hướng mũi tàu ( $180^\circ$ ) và sóng vuông góc với mạn tàu ( $90^\circ$ ). Sử dụng phần mềm mô phỏng sóng của trung tâm LINK-SIC [8]. Các kết quả mô phỏng sóng được trình bày trên hình 10 dưới đây.



a) Sóng đến từ mũi tàu

b) Sóng đến từ mạn tàu

Hình 10. Kết quả mô phỏng sóng cấp 6 và tàu trên sóng theo 02 phương.

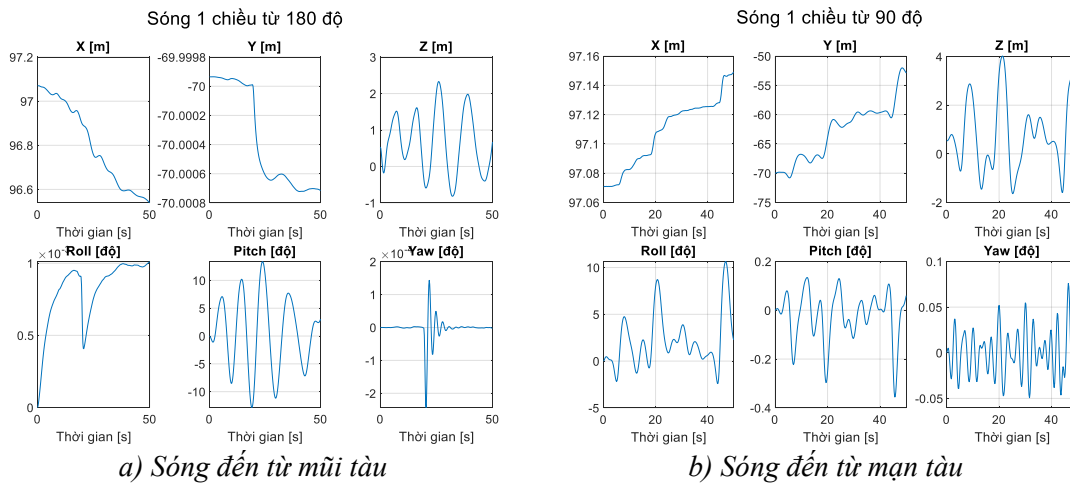
##### 4.2. Mô phỏng dao động tàu biển

Sau khi nhận được kết quả mô phỏng sóng, tiến hành mô phỏng dao động của tàu. Các thông số tàu được sử dụng trong bài báo này được trình bày trong bảng 1 dưới đây.

**Bảng 1.** Các thông số của tàu biển.

TT	Tên thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Chiều dài tàu	L	137	m
2	Lượng chiếm nước	D	$25 \times 10^6$	N
3	Chiều rộng tàu	B	15	m
4	Chiều cao tàu	H	16	m
5	Chiều cao trọng tâm tàu	$Z_g$	2,5	m

Sử dụng chương trình mô phỏng tàu của LINK-SIC [8] với điều kiện mô phỏng là tàu thả neo, kết quả mô phỏng trên hình 11 là những dao động của trọng tâm tàu tương ứng với các hướng sóng.



a) Sóng đến từ mũi tàu

b) Sóng đến từ mạn tàu

**Hình 11.** Kết quả mô phỏng dao động tàu trên sóng cấp 6 đến từ mũi tàu.

Từ kết quả mô phỏng dao động tàu trên hình 11 chúng ta có thể nhận thấy một số điểm như sau: (1) Đối với các thông số X, Y của trọng tâm tàu thay đổi nhỏ và cơ bản gần theo dạng tuyến tính đúng với phản ứng khi có sóng tác động; (2) Dao động thông số Z là đáng kể với biên độ lên đến 4 m (cấp sóng 6 có biên độ sóng lên đến 6 m); (3) Các góc Euler phản ứng đúng với biên độ nhỏ hơn 10 độ.

Từ những nhận xét này, khi áp dụng cho hệ tái tạo dao động tàu, chúng ta cần phải xử lý tín hiệu này do thông số hành trình theo trục Z của robot song song khó có thể đảm bảo lên đến 6 m và các thông số về tọa độ X, Y có thể cho xấp xỉ bằng không. Do đó, về cơ bản đầu vào hệ tạo dao động tàu tập trung vào thông số theo trục Z và các góc Euler.

### 4.3. Mô phỏng hệ tái tạo dao động

Mô hình robot song song 6 bậc tự do dạng Gough-Stewart trong bài báo này sử dụng các thông số của robot song song eMotion-1500/2700-6DOF-650-MK1 của hãng Bosch Rexroth. Các thông số cơ bản của robot song song eMotion-1500 được trình bày trong bảng 2 và bảng 3 dưới đây.

Từ thông số của robot song song eMotion-1500, tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng bằng công cụ Simechanics của Matlab [14]. Đầu vào của mô hình là dao động tại vị trí trọng tâm tàu. Các dao động này đã được xử lý để phù hợp với chuyển động của robot eMotion-1500. Tín hiệu vào này đã được xử lý có chỉ số  $ref$  trên các hình 12 đến hình 15 dưới đây. Thông số bộ điều khiển PID cho hệ tái tạo dao động  $K_P = 5 \times 10^4$ ,  $K_I = 2 \times 10^4$ ,  $K_D = 4 \times 10^3$ .

**Bảng 2.** Các thông số động học của robot eMotion-1500.

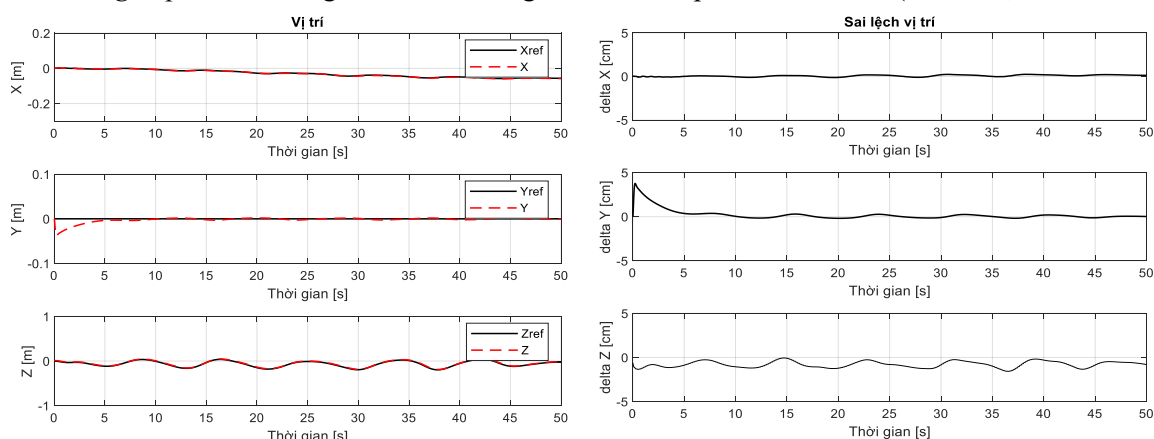
	$r_i(m)$	$h_i(m)$	$\theta_i(độ)$	$\sigma_i(độ)$
Đế cố định	1.28	0.172	120	8.6
Khâu công tác	0.931	0.1532	120	20.86

**Bảng 3.** Các thông số khác của robot eMotion-1500.

Khối lượng robot phân di chuyển chưa tính tải	1753 kg
Tải trọng lớn nhất	1500 kg
Khối lượng 1 chân	140 kg
Hành trình của một chân	0,65 m
Độ cao mặt phẳng khâu công tác ở vị trí thấp nhất	1,255 m

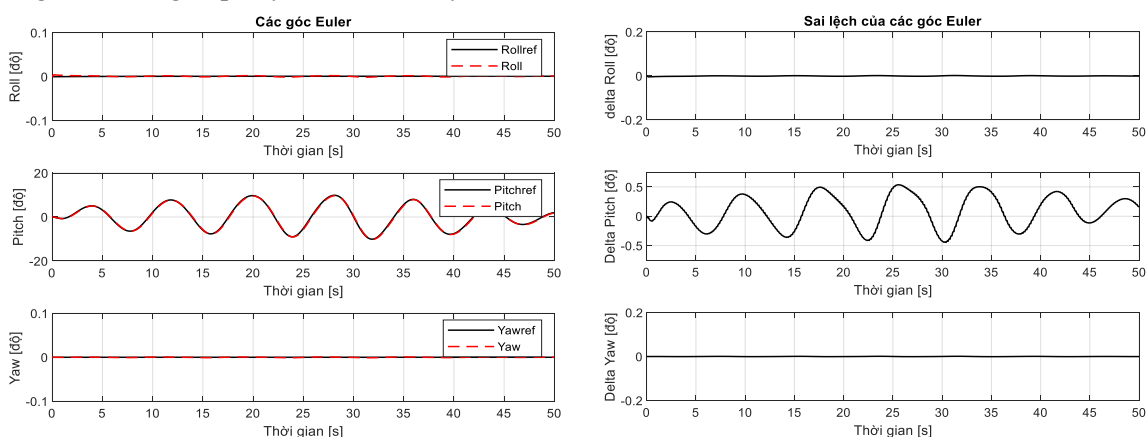
Tiến hành mô phỏng hệ tái tạo dao động với các trường hợp sau:

**Trường hợp 1:** Dao động của tàu với sóng một chiều cấp 6 đi từ mũi tàu (hình 10a).



**Hình 12.** Đồ thị tái tạo dao động vị trí tâm tàu và sai số khi sóng đi vào mũi tàu.

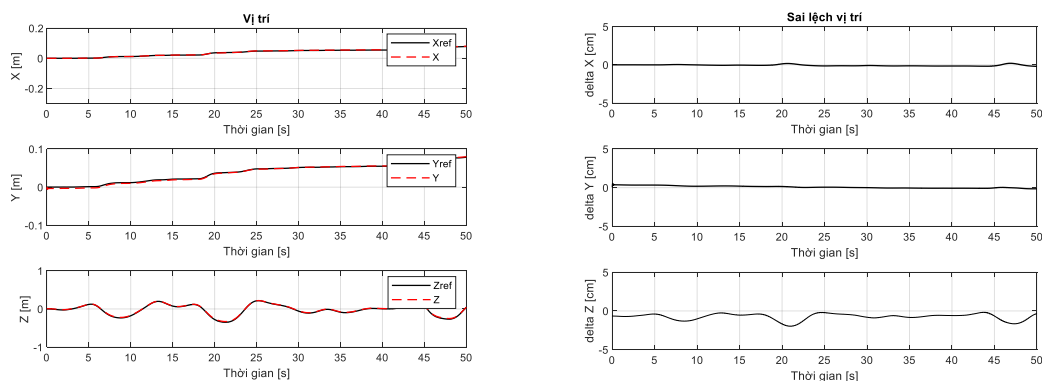
Tín hiệu đầu vào của Hệ tái tạo dao động tàu trên hình 11a đã được xử lý tín hiệu kênh X, Y thành dao động nhỏ, còn kênh Z được qui chuẩn về khả năng chuyển động lớn nhất của khâu công tác robot song sóng eMotion-1500. Kết quả mô phỏng vị trí, góc Euler cùng sai số tương ứng của trường hợp này được trình bày trên hình 12 và hình 13.



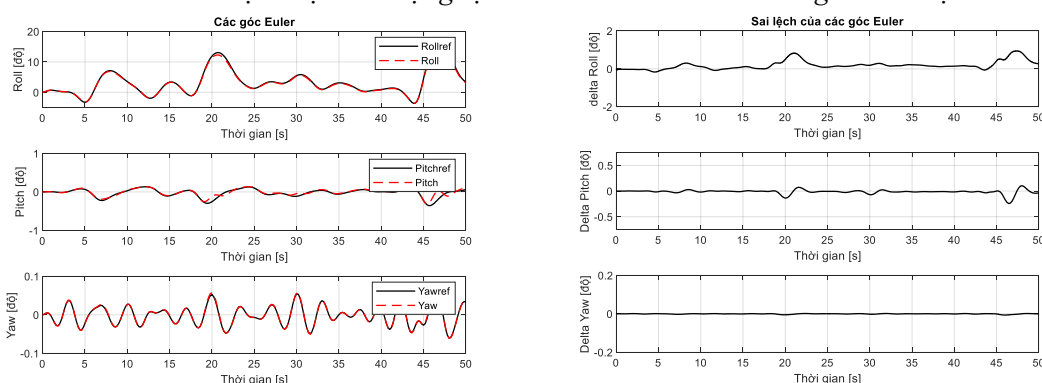
**Hình 13.** Đồ thị tái tạo dao động các góc Euler tâm tàu và sai số khi sóng đi vào mũi tàu.

**Trường hợp 2:** Dao động của tàu với sóng một chiều cấp 6 đi từ mạn tàu (hình 10b).

Tín hiệu đầu vào của Hệ tái tạo dao động tàu trên hình 11b, tương tự cũng được xử lý tín hiệu kênh X, Y thành dao động nhỏ, còn kênh Z được qui chuẩn về khả năng chuyển động lớn nhất của khâu công tác robot song sóng eMotion-1500. Kết quả mô phỏng của trường hợp này được trình bày trên hình 14 và hình 15.



Hình 14. Đồ thị tái tạo dao động vị trí tâm tàu và sai số khi sóng đi vào mạn tàu.



Hình 15. Đồ thị tái tạo dao động các góc Euler tâm tàu và sai số khi sóng đi vào mạn tàu.

**Đánh giá:** Từ kết quả của hai trường hợp mô phỏng trên, có thể nhận xét và đánh giá sau: (1) Hệ tái tạo dao động tàu được thiết kế với bộ điều khiển PID đơn giản và cơ cấu chấp hành robot song song 6 bậc tự do dạng Gough-Stewart đã thực hiện đúng chức năng thiết kế là tái tạo tín hiệu đầu vào dao động của tàu sau khi đã được xử lý tỷ lệ cho phù hợp, điều này làm cơ sở cho việc phát triển cho hệ tái tạo dao động bán tự nhiên; (2) Các tín hiệu đầu ra theo các kênh đã bám theo các dao động đầu vào với sai số nhỏ cả về vị trí và hướng. Cụ thể đối với vị trí, sai số cực đại nhỏ hơn 5 cm (khoảng 10%) và sai số trung bình <1%, còn sai số cực đại của các góc Euler nhỏ hơn 1 độ (khoảng 10%), sai số trung bình cũng <1%. Đối với những bài toán nghiên cứu trên nền dao động tái tạo như mô phỏng lái tàu, các hệ thống điều khiển ổn định thì những sai số này có thể chấp nhận được khi nghiên cứu trong phòng thí nghiệm.

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày việc nghiên cứu về mô hình sóng biển một chiều (long-crested), mô hình chuyển động của tàu và dao động của tàu biển trên nền sóng biển cho trước với hai trường hợp sóng đi từ mũi tàu (180 độ) và sóng đánh vào mạn tàu (90 độ) khi tàu đứng thả neo, những nghiên cứu này đã sử dụng bộ chương trình mô phỏng sóng và tàu của trung tâm LINK-SIC thuộc Đại học Linköping. Phần nghiên cứu mô hình sóng và dao động đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng mô hình mô phỏng Hệ tái tạo dao động với robot song song 6 bậc tự do dạng Gough – Stewart. Mô hình Hệ tái tạo dao động của tàu nhận được trên phần mềm Matlab/Simulink thông qua công cụ Simechanics. Tiến hành xử lý tín hiệu đầu vào cho phù hợp với hệ và mô phỏng hệ thống. Các kết quả mô phỏng đảm bảo độ chính xác của việc tái tạo các dao động tàu biển. Từ những kết quả này, bài báo đã giải quyết bài toán tái tạo dao động trọng tâm tàu biển, làm cơ sở để tạo ra các dao động ở bất kỳ vị trí nào của tàu biển, phục vụ cho các nghiên cứu các bài toán khác nhau ví dụ như hệ thống ổn định vũ khí, hệ ngắm quang điện tử,... được lắp đặt trên tàu. Kết quả nghiên cứu này làm tiền đề cho nghiên cứu tái tạo dao động

phương tiện cơ động nói chung và tàu biển nói riêng trên hệ thống bán tự nhiên với robot song song eMotion-1500 thực tế.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả cảm ơn sự cho phép sử dụng các dữ liệu của robot song song eMotion-1500 của Phòng thí nghiệm Nghiên cứu và phát triển robot quân sự/Bộ môn Robot đặc biệt và Cơ điện tử, Khoa Hàng không vũ trụ, Học viện Kỹ thuật quân sự. Đồng thời cảm ơn sự phối hợp nghiên cứu cũng như sử dụng một số kết quả từ đề tài cấp Bộ Quốc phòng “Nghiên cứu thiết kế, chế tạo hệ chuyển động 6 bậc tự do ứng dụng trong mô phỏng huấn luyện sẵn sàng chiến đấu”.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Charles C., et al, “Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist,” Computers & electrical engineering 17.3, pp. 191-203, (1991).
- [2]. Fossen, T. I, “Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control,” John Wiley & Sons, pp. 200-220, (2011).
- [3]. Trương Sĩ Cáp, Lê Hồng Bang, “Động lực học tàu biển trên sóng,” Đại học Hàng Hải Việt Nam (2001).
- [4]. Faltinsen O., “Sea Loads on Ships and Offshore”, Cambridge University Press, ISBN-10: 0521458706, (1993).
- [5]. Ghadimi P., Abbas D., and Yaser F. M., “Initiating a Mathematical Model for Prediction of 6-DOF Motion of Planing Crafts in Regular Wave”, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Engineering Mathematics, , Article ID 853793, (2013).
- [6]. Hamid D. Taghirad, “Parallel Robots: Mechanics and Control”, CRC Press, ISBN-10: 1138077380, ISBN-13: 978-1138077386, (2017).
- [7]. Lewis E.V. “Principles of Naval Architecture volume III: Motions in Waves and Controllability” SNAME, (1989).
- [8]. <https://github.com/LINK-SIC-2021-Bernat-Granstrom/ship-simulator>.
- [9]. MIT, “Water waves”. <http://web.mit.edu/13.021/demos/lectures/lecture19.pdf>.
- [10]. Trần Công Nghị, “Lý thuyết tàu thủy,” Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh, tr. 190-196, (2009).
- [11]. Nikolai Kornev, “Ship dynamics in waves”, [https://www.lemos.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle\\_MSFLemos/Lehre/Sommersemester/Dynamik\\_ST\\_II/STII\\_Ship\\_dynamics\\_in\\_waves.pdf](https://www.lemos.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_MSFLemos/Lehre/Sommersemester/Dynamik_ST_II/STII_Ship_dynamics_in_waves.pdf)
- [12]. Skandalı, Danai, “Identification of response amplitude operators for ships based on full scale measurements,” Delft: Heerema Marine Contractors, (2015).
- [13]. Shashwat S., Anindya C., “Planar oscillations of a boat in a tank”, International Journal of Mechanical Sciences 79, pp. 152–161, (2014).
- [14]. Nguyen Thanh Son, Hoang Quang Chinh, Nguyen Dinh Quan, “Investigation on offshore access stabilization Systems-Simulation using the blockset SimMechanics in Matlab/Simulink,” J. of Science and Technique, Military Technical Academy, Vol. 183, pp. 88-100, (2017).
- [15]. Yang S., Yan L., Mingxia Z. and Pinle Q., “The simulation of ship oscillatory motions in irregular waves”, Applied Mechanics and Materials Vols 66-68, pp 1296-1300, (2011).
- [16]. Yang S., Wang X., Chen G. “Design and Implement on Intelligent Ship Handling Simulator”, International Conference on Digital Manufacturing & Automation, (2010).
- [17]. Zhang X., Jin Y., Yin Y., Ren H., Liu X., “Ship Motion Modeling and Simulation in Ship Handling Simulator”, International Conference on Audio, Language and Image Processing, Proceedings, (2012).
- [18]. “Coriolis force”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_force).

### ABSTRACT

#### Simulation of vessel oscillation using parallel robot

*This paper presents the research results of building a model of reproducing the vessel's oscillations based on a Gough - Stewart parallel robot with 6 degrees. Oscillation data at the vessel's center of gravity calculated by simulation software will be input to the model. The control system uses a simple PID controller to track the input trajectory. The simulation results on Matlab/Simulink software have shown the reproducing of vessel oscillations with the allowed error.*

**Keywords:** Parallel robots; Kinematics; Reproducing the ship's oscillations; Oscillation simulation.