

**XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BẨM QUỸ ĐẠO  
DỰA TRÊN MÔ HÌNH DỰ BÁO THEO NGUYÊN LÝ TÁCH  
KHI CÓ RÀNG BUỘC TÍN HIỆU ĐIỀU KHIỂN  
BUILD GLOBAL TRACKING SHIP MOTION CONTROLLER  
BASED ON THE SEPARATION PRINCIPLE OF MODEL PREDICTIVE  
CONTROLLER WITH INPUT CONSTRAINTS**

**NGUYỄN HỮU QUYỀN<sup>1\*</sup>, TRẦN ANH DŨNG<sup>1</sup>, TRƯƠNG CÔNG MỸ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

<sup>2</sup>Phòng Công tác sinh viên, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: [nguyenhuuquyenhd@gmail.com](mailto:nguyenhuuquyenhd@gmail.com)

**Tóm tắt**

*Bài báo đề cập tới vấn đề phân tích mô hình toán tàu thủy 3 bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành trên mặt phẳng ngang. Nghiên cứu thuật toán bộ điều khiển dự báo MPC (Model Predictive Control) phản hồi đầu ra. Trên cơ sở đó xây dựng bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách để điều khiển chuyển động tàu thiếu cơ cấu chấp hành bám theo quỹ đạo đặt khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển.*

**Từ khóa:** Điều khiển dự báo theo nguyên lý tách, mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành, ràng buộc tín hiệu điều khiển.

**Abstract**

*The article refers to the problem of analysis the three degrees of freedom (3 DOF) underactuated ship mathematic model on horizontal plane. Research the output feedback model predictive control algorithms. On that basis, build the output feedback predictive controller model based on separation principle to control global tracking underactuated ship motion with input constraints.*

**Keywords:** Output feedback model predictive control (OFMPC), underactuated vessel models, Input constraints.

**1. Giới thiệu**

Tàu thủy là đối tượng có tính phi tuyến lớn, các phương pháp thiết kế bộ điều khiển tàu thủy thiếu cơ cấu chấp hành chuyển động bám theo quỹ đạo đặt rất phong phú và luôn là thách thức đối với cộng đồng nghiên cứu về điều khiển bởi tính chất thiếu cơ cấu chấp hành của nó là số tín hiệu điều khiển ít hơn số biến trạng thái cần được điều khiển. Tổng quan các phương pháp thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy trong những năm gần đây là rất phong phú như: Điều khiển ổn định hướng đi sử dụng bộ điều khiển PID với mô hình đơn giản của NOMOTO [6], điều khiển tuyến tính: LQR (Linear Quadratic Regulator), LQG (Linear Quadratic Gaussian) sử dụng các mô hình toán tàu thủy đơn giản hóa như mô hình Sway-Yaw (mô hình điều động tuyến tính 2 bậc tự do), mô hình Davidson-Schiff [6],... các bộ điều khiển tuyến tính này sử dụng mô hình đơn giản hóa không đáp ứng được yêu cầu trong bài toán điều khiển quỹ đạo với số biến điều khiển ít. Điều khiển phi tuyến với các bộ điều khiển: Backstepping [7], điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Control) [10], điều khiển mặt động DSC (Dynamic Surface Control) [3], điều khiển thích nghi [9], điều khiển theo phương pháp tiếp cận số [8] hay các bộ điều khiển phi tuyến kết hợp với điều khiển Mờ, Neural để giải quyết các thành phần bất định phát sinh trong mô hình tàu [11],... sử dụng các bộ điều khiển phi tuyến trên đã giải quyết tốt được bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt, tuy nhiên việc thiết kế các bộ điều khiển trên còn gặp phải những hạn chế như: việc xác định hàm điều khiển Lyapunov để xây dựng bộ điều khiển phi tuyến trên là phức tạp. Việc áp đặt điều kiện ràng buộc tín hiệu điều khiển đầu vào của các bộ điều khiển trên để đạt được đầu ra bám theo quỹ đạo đặt là rất khó khăn, trong khi bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy thường phải yêu cầu đặt ra tín hiệu điều khiển nằm trong giới hạn cho phép (ví dụ góc bệ lái phải thỏa mãn  $-35^{\circ} \leq \delta \leq 35^{\circ}$ ). Hơn nữa trong các bộ điều khiển trên thì các biến trạng thái trong mô hình tàu của công thức (1) dưới đây đều phải giả thiết là đo đạc, xác định được việc này sẽ là khó khăn đối với đối tượng tàu thủy. Điều khiển dự báo MPC là một phương pháp tổng quát thiết kế bộ điều khiển trong miền thời gian có thể áp dụng cho hệ tuyến tính cũng như hệ phi tuyến. Một ưu điểm khác của MPC là có thể điều khiển các quá trình có tín hiệu điều khiển bị chặn, có các điều kiện ràng buộc [1, 2]. Việc áp dụng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách (nghĩa là sự kết hợp giữa bộ điều khiển MPC phản hồi trạng thái và bộ quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục) để điều khiển chuyển động tàu thủy là một phương pháp có thể đáp ứng các yêu cầu đặt ra trong điều khiển chuyển động tàu thủy khi có xét đến ràng buộc tín hiệu điều khiển.

## 2. Mô hình toán chuyển động tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành

Chuyển động của tàu thủy xét trong mặt phẳng ngang được đặc trưng bởi các thành phần: trượt dọc, trượt ngang, quay trở, bỏ qua thành phần lắc ngang, lắc dọc, trượt đứng. Mô tả chuyển động tàu thủy 3 bậc tự do, xét trong mặt phẳng ngang được đặc trưng bởi:  $\underline{v} = [u \ v \ r]^T \in R^3$  lần lượt là tốc độ trượt dọc, ngang, quay trở  $\underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T \in R^3$  lần lượt là tọa độ theo trục  $x$ , trục  $y$ , hướng mũi tàu.

Phương trình mô tả chuyển động tàu thủy 3 bậc tự do được đưa ra trong [6] như sau:

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

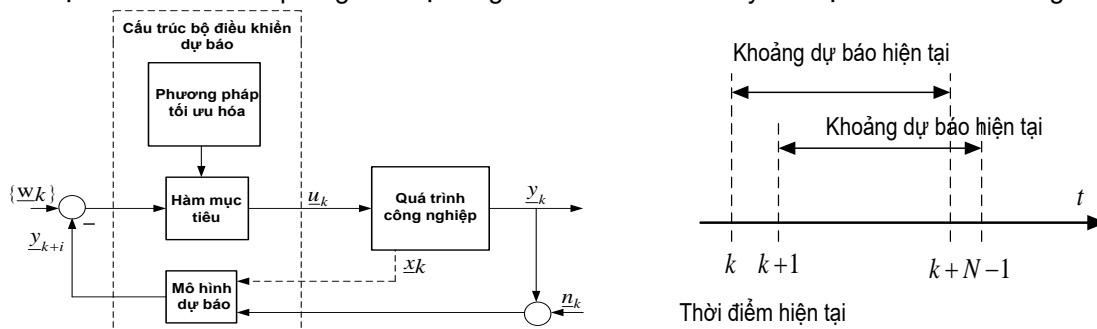
Trong đó:  $M, C(\underline{v}), D(\underline{v}), \underline{\tau}, J(\underline{\eta})$  lần lượt là ma trận quán tính là ma trận Coriolis và hướng tâm, ma trận giảm chấn thủy động lực học, vectơ của lực và mômen điều khiển (bao gồm lực tác động của chân vịt và góc bánh lái  $\delta$ ) và ma trận trực giao,  $\underline{\tau}_w$  là nhiễu tác động. Trong (1) nếu tín hiệu lực điều khiển  $\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ , thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành (*Full Actuated*). Nếu  $\underline{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$  tức là mô hình tàu không có thành phần lực gây ra trượt ngang 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*) [3]. Đây là loại tàu mà chỉ có 2 cơ cấu thực hiện là chân vịt chính và bánh lái chính sau lái. Mô hình toán này thường gặp phổ biến là các tàu chở hàng, tàu Container,... có hành trình chuyển đi dài. Mô hình tàu thiếu cơ cấu chấp hành ba bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \end{cases} \quad \text{với } \underline{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T \quad (2)$$

## 3. Điều khiển dự báo theo mô hình

### a. Cấu trúc hệ điều khiển dự báo

Điều khiển dự báo theo mô hình (Model Predictive Control - MPC), hay gọi tắt là điều khiển dự báo, đề cập đến một họ các phương pháp điều khiển sử dụng một mô hình toán học để dự báo tín hiệu ra của đối tượng (quá trình) trong tương lai. Tại mỗi thời điểm trích mẫu, thuật toán điều khiển dự báo sẽ tối ưu đáp ứng của hệ bằng cách tính toán ra dãy tín hiệu điều khiển tương lai [5].



Hình 1. Cấu trúc của bộ điều khiển dự báo

**Khâu mô hình dự báo:** Khâu này có nhiệm vụ xác định tín hiệu ra tương lai  $y_{k+i}$  tính từ thời điểm hiện tại  $k$ .  $y_{k+i} = y_{k+i}(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1})$

**Khâu hàm mục tiêu:** Là khâu xây dựng từ chất lượng mong muốn mà hệ thống phải có tín hiệu ra  $y_k$  bám theo được dãy giá trị tín hiệu mẫu  $w_k$  đặt trước,

**Khâu tối ưu hóa:** Là khâu tìm nghiệm  $u_k$  để hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất.

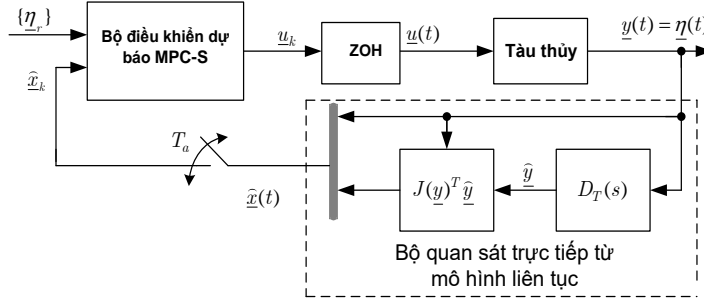
### b. Nguyên lý hoạt động của MPC

Nguyên lý hoạt động của MPC theo nguyên tắc vòng lặp trượt dọc trên trục thời gian (receding horizon control), có cấu trúc như Hình 1. Bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách là sự ghép nối bộ điều khiển phản hồi trạng thái và một bộ quan sát trạng thái.

## 4. Xây dựng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách có ràng buộc tín hiệu điều khiển để điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo đặt

Vấn đề đặt ra cho bài toán là xây dựng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách cho tàu thủy có mô hình dạng như (2) (dưới đây sẽ được chuyển về dạng song tuyến) với ràng

buộc tín hiệu điều khiển là góc bẻ lái  $-35^0 \leq \delta \leq 35^0$  hay mômen quay trở  $-\tau_{\min} = a \leq \tau_r \leq 35^0 \tau_{\max} = b$  (theo quy định đối với tàu biển). Cấu trúc bộ điều khiển như Hình 2



**Hình 2. Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra với bộ quan sát trạng thái trực tiếp**

a. Chuyển mô hình tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành sang dạng song tuyến

Từ mô hình (2) đặt  $\underline{x}_1 = \underline{\eta}$ ,  $\underline{x}_2 = \underline{\nu}$ ,  $\underline{u} = \underline{\tau}$  và  $\underline{x} = \text{col}(\underline{x}_1, \underline{x}_2)$  ta có được

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{\eta}} \\ \dot{\underline{\nu}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{\eta}) \\ -G(\underline{\eta}) & -M^{-1}[C(\underline{\nu}) + D(\underline{\nu})] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{\eta} \\ \underline{\nu} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix} \underline{\tau} \quad (3)$$

Đặt:

$$A(\underline{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & J(\underline{x}_1) \\ -G(\underline{x}_1) & -M^{-1}[C(\underline{x}_2) + D(\underline{x}_2)] \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ M^{-1}F \end{pmatrix}, \quad C = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3}) \quad (4)$$

Khi đó mô hình (3) có dạng:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B\underline{u} \\ \underline{y} = \underline{\eta} = (I_3, \mathbf{0}_{3 \times 3})\underline{x} = C\underline{x} \end{cases} \quad (5)$$

Mô hình (5) là dạng mô hình song tuyến vì có ma trận  $A(\underline{x})$  phụ thuộc vào biến trạng thái  $\underline{x}$ . Do bộ điều khiển MPC sử dụng cho mô hình rời rạc, do đó mô hình (5) sẽ được rời rạc hóa theo thời gian với chu kỳ trích mẫu  $T_a$  và áp dụng phép xấp xỉ  $\dot{\underline{x}}(t) \approx [\underline{x}((k+1)T_a) - \underline{x}(kT_a)]/T_a$ . Khi đó mô hình (5) có dạng:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = [I_6 + T_a A(\underline{x}_k)]\underline{x}_k + T_a B \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C \underline{x}_k \end{cases}$$

Tuyến tính hóa mô hình (5) theo từng đoạn dọc trục thời gian theo [1] được mô hình dạng song tuyến mới  $\mathcal{H}_k$  như sau:

$$\mathcal{H}_k: \begin{cases} \underline{z}_{k+1} = \bar{A}_k \underline{z}_k + \bar{B} \Delta \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = \bar{C} \underline{z}_k \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:  $\underline{z}_k = \text{col}(\underline{x}_k, \underline{u}_{k-1}) \in \mathbb{R}^8$ ,  $\Delta \underline{u}_k = \underline{u}_k - \underline{u}_{k-1} \in \mathbb{R}^2$ ,  $\bar{C} = (C, \mathbf{0}_{3 \times 2}) \in \mathbb{R}^{3 \times 8}$

và  $\bar{A}_k = \begin{pmatrix} I_6 + T_a A(\underline{x}_k) & T_a B \\ \mathbf{0}_{2 \times 6} & I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ ,  $\bar{B} = \begin{pmatrix} T_a B \\ I_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{8 \times 2}$

b. Xây dựng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách

- Khối đầu ra dự báo: Từ mô hình xấp xỉ tuyến tính từng đoạn  $\mathcal{H}_k$  với  $k = 0, 1, \dots$  cho ở (6), theo nguyên lý điều khiển dự báo, các đầu ra tương lai viết theo cấu trúc vector cho toàn bộ cửa sổ dự báo (N) như sau:

$$\underline{y}_k = \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \underline{y}_{k+2} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C}\bar{A}_k\bar{B} & \bar{C}\bar{B} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}\bar{A}_k^{N-1}\bar{B} & \bar{C}\bar{A}_k^{N-2}\bar{B} & \cdots & \bar{C}\bar{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \underline{u}_k \\ \Delta \underline{u}_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta \underline{u}_{k+N-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{A}_k \\ \bar{C}\bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C}\bar{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k = H_k \underline{p} + \underline{b}_k \quad (7)$$

Với:

$$H_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C}\bar{A}_k\bar{B} & \bar{C}\bar{B} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}\bar{A}_k^{N-1}\bar{B} & \bar{C}\bar{A}_k^{N-2}\bar{B} & \cdots & \bar{C}\bar{B} \end{pmatrix}, \underline{p} = \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N-1} \end{pmatrix}, \underline{b}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{A}_k \\ \bar{C}\bar{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C}\bar{A}_k^N \end{pmatrix} \underline{z}_k \quad (8)$$

Trong đó:  $\underline{p}$  là vector các tín hiệu đầu vào tương lai cần phải được xác định:

- *Khối hàm mục tiêu:* Sau khi đã có được các tín hiệu đầu ra tương lai  $\underline{y}_{k+i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  thuộc cửa sổ dự báo hiện tại dưới dạng các hàm số của tín hiệu đầu vào tương lai  $\Delta u_{k+j}$ ,  $j = 0, 1, \dots, N-1$  cho ở công thức (7) thì để xác định được các đầu vào tương lai này sao cho đầu ra bám theo được dãy tín hiệu đặt  $\{\underline{\eta}_k\}$ , ta cần một khối hàm mục tiêu thể hiện được mục đích bám tín hiệu đặt đó và một trong các hàm mục tiêu thể hiện được điều này là tổng bình phương các sai lệch bám thuộc của sổ dự báo hiện tại. Nhằm nâng cao được tốc độ bám, ở đây bài báo sẽ sử dụng kỹ thuật hiệu chỉnh tín hiệu đặt đã được sử dụng trong [4], mà cụ thể là tín hiệu đặt sau hiệu chỉnh  $\underline{r}_k$  như sau:

$$\underline{r}_k = \begin{pmatrix} \underline{\eta}_{k+1} - K'e_k \\ \vdots \\ \underline{\eta}_{k+N} - K'e_k \end{pmatrix} \text{ với } \underline{\eta}_k = \underline{\eta}(kT_a) \quad (9)$$

Trong đó:  $\underline{e}_k = \underline{y}'_k - \underline{\eta}_k$  là sai lệch bám dư thừa ở thời điểm trước đó và  $K'$  trong công thức (9) là tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt tùy chọn,  $0 < K' < 1$ . Hàm mục tiêu được chọn sẽ là:

$$J'_k(\underline{p}) = \underline{p}^T \left( H_k^T Q_k H_k + R_k \right) \underline{p} + 2(\underline{b}_k - \underline{r}_k)^T Q_k H_k \underline{p} \rightarrow \min_{\underline{p}} \quad (10)$$

- *Khối hàm tối ưu hóa:* Nhiệm vụ của khối tối ưu hóa là xác định nghiệm của bài toán tối ưu:

$$\underline{p}^* = \arg \min_{\underline{p} \in P} J'_k(\underline{p}) \quad (11)$$

Có tập ràng buộc  $P$  được suy ra từ điều kiện ràng buộc góc bẻ lái của bài toán điều khiển chuyển động tàu thủy như sau:

$$P = \Delta U^N \text{ với } \Delta U = \left\{ \Delta u \in \mathbb{R}^2 \mid \underline{a}(x_k) - \underline{a}(x_{k-1}) \leq \Delta u \leq \underline{b}(x_k) - \underline{b}(x_{k-1}) \right\} \quad (12)$$

Các phương pháp cơ bản để tìm nghiệm của bài toán tối ưu có ràng buộc này, bao gồm những phương pháp truyền thống như SQP, interior-point, hay các phương pháp tối ưu tiến hóa như giải thuật di truyền (GA), tối ưu bầy đàn (PSO) bằng các lệnh MatLab tương ứng **fmincon()**, **ga()**, **particleswarm()**

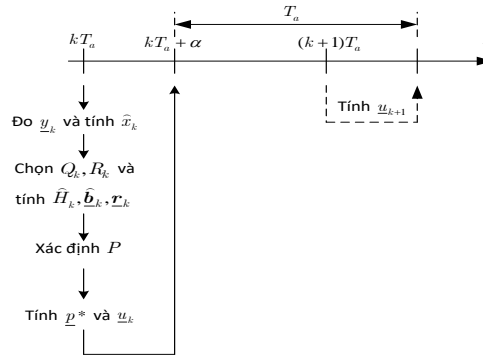
### c. Xây dựng bộ quan sát trạng thái trực tiếp từ mô hình liên tục

Phương pháp này được xây dựng trực tiếp từ mô hình liên tục (2), hoặc (4), của mô hình chuyển động tàu thủy trên cơ sở giả thiết rằng phép đo tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t)$  là chính xác. Nhiệm vụ của bộ quan sát là xác định được các vector trạng thái  $\underline{x} = \text{col}(\underline{\eta}, \underline{v})$  của hệ liên tục tương ứng (3) hoặc (5). Trong hai thành phần  $\underline{\eta}(t)$ ,  $\underline{v}(t)$  của vector trạng thái  $\underline{x}(t) = \text{col}(\underline{\eta}(t), \underline{v}(t))$ , do có đầu ra  $\underline{y}(t) = \underline{\eta}(t)$ , nên khi đo được tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t)$  một cách chính xác, ta cũng có ngay được chính xác thành phần thứ nhất  $\underline{\eta}(t)$ . Bởi vậy nhiệm vụ quan sát lúc này chỉ còn là xác định thành phần thứ hai  $\underline{v}(t)$ . Từ quan hệ giữa hai thành phần trạng thái  $\underline{\eta}(t)$ ,  $\underline{v}(t)$  cho ở mô hình (2) là:  $\dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v}$  thì do đã có  $\underline{\eta}(t) = \underline{y}(t)$  và ma trận  $J(\underline{\eta})$  là trực giao, nên cũng sẽ có được thành phần trạng thái  $\underline{v}(t)$  còn lại thông qua:  $\underline{v}(t) = J(\underline{\eta})^T \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{y})^T \dot{\underline{y}}$  nếu như đã có được giá trị đạo hàm  $\dot{\underline{y}}(t)$  của tín hiệu đầu ra  $\underline{y}(t)$ . Để làm được điều này ta sẽ sử dụng khâu vi phân quán tính bậc nhất (khâu DT1), là một khâu hợp thức, causal:  $D_T(s) = \frac{s}{1+Ts}$  với hằng số  $T > 0$  rất nhỏ tùy chọn, có đầu vào là  $\underline{y}(t)$ .

Do ở đây có  $T \approx 0$  nên đầu ra của nó, ký hiệu bởi  $\hat{y}(t)$  sẽ là:  $\hat{y} + T\dot{\hat{y}} = \dot{y}$  hay  $\hat{y} \approx \dot{y} = J(\eta)v$ . Cuối cùng tín hiệu quan sát được là:

$$v(t) = J(\eta)^T \dot{\eta} = J(y)^T \dot{y} \approx J(y)^T \hat{y}$$

d. Xây dựng thuật toán bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách có ràng buộc tín hiệu điều khiển cho điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu điều khiển:

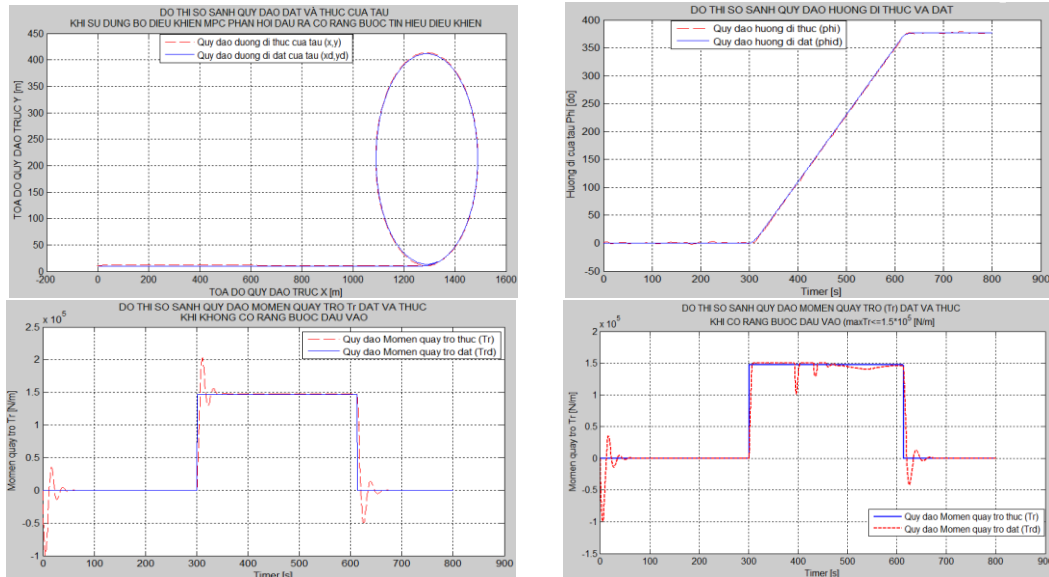


Hình 3. Nội dung thuật toán điều khiển dự báo phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách có ràng buộc tín hiệu điều khiển cho điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy

Trong đó  $\hat{x}_k$  là trạng thái quan sát được từ bộ quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục và  $\hat{H}_k, \hat{b}_k$  với bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra lúc này xác định như sau:

$$\hat{H}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{B} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \dots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \bar{C}\mathcal{A}_k\bar{B} & \bar{C}\bar{B} & \dots & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^{N-1}\bar{B} & \bar{C}\mathcal{A}_k^{N-2}\bar{B} & \dots & \bar{C}\bar{B} \end{pmatrix}, \hat{b}_k = \begin{pmatrix} \bar{C}\mathcal{A}_k \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^2 \\ \vdots \\ \bar{C}\mathcal{A}_k^N \end{pmatrix} \hat{z}_k \quad (13)$$

e. Mô phỏng kiểm chứng chất lượng bộ điều khiển MPC



Hình 4. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách có ràng buộc thông qua chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo khi có ràng buộc tín hiệu điều khiển

Kiểm chứng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách có ràng buộc thông qua mô phỏng trên Matlab. Số liệu tham số ma trận mô phỏng trong mô hình tàu (2) được lấy từ thông số tàu MARINTEK trong [3]. Bộ điều khiển được đưa ra theo thuật toán điều khiển hình (3), trong đó cửa sổ dự báo chọn  $N = 4$ , ma trận xác định dương:  $R = I, Q = 3R$ , thời gian trích mẫu  $T_a = 0,05(s)$  tham số hiệu chỉnh tín hiệu đặt  $0 < K' < 1$ . Quỹ đạo đặt  $\underline{\eta}_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]$  được tạo ra thông qua tàu ảo thỏa mãn mô hình động học (2). Với quỹ đạo chuyển động tàu chia ra làm hai giai đoạn: giai đoạn

---

một tàu chạy với quỹ đạo thẳng trong thời gian 300(s), giai đoạn hai tàu chạy với quỹ đạo vòng tròn với bán kính 200(m), thời gian mô phỏng 800(s). Coi nhiễu tác động là nhiễu ergodic, phân bố chuẩn và có kỳ vọng bằng 0. Kết quả mô phỏng Hình 4.

## 5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng thuật toán cho bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra với bộ quan sát trực tiếp từ mô hình liên tục theo nguyên lý tách và có ràng buộc tín hiệu điều khiển trong việc điều khiển bám quỹ đạo của tàu thiếu cơ cấu chấp hành. Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy đặc tính đầu ra (quỹ đạo, hướng đi) đáp ứng bám tốt tín hiệu quỹ đạo và hướng đi đặt trong hai trường hợp có và không có tín hiệu ràng buộc. Khi tín hiệu điều khiển Mômen quay trở  $\tau_r$  bị ràng buộc điều này đảm bảo cho góc bẻ lái không vượt quá giá trị cho phép về độ lớn đối với tàu biển điều này thường được bỏ qua trong các công trình khi nghiên cứu về điều khiển chuyển động tàu thủy và bộ điều khiển MPC có khả năng kháng nhiễu.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Doãn Phước. *Tối ưu hóa trong điều khiển và điều khiển tối ưu*. NXB Bách khoa Hà Nội, 2010.
- [2] Camacho, E. and Bordons, C: *Model predictive control*, Springer, 1999.
- [3] Do K. D, Jie Pan. *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*: Springer Science & Business Media, 2009.
- [4] Moore, K.L.: *Iterative learning control for deterministic systems*. London, Springer Verlag, 1993.
- [5] Maciejowski, M.J.: *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, 2011.
- [6] Fossen T. I.: *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [7] Yu-lei Liao, Lei Wan, Jia-yuan Zhuang: *Backstepping dynamical sliding mode control method for the path following of the underactuated surface vessel*, National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, 2011.
- [8] Mario E. Serrano, Gustavo J. E. Scaglia, Vicente Mut, Oscar A. Ortiz, Mario Jordan: *Tracking Trajectory of Underactuated Surface Vessels: a Numerical Method Approach*, National University of San Juan, Argentine, CEAI, Vol.15, No.4 pp. 15-25, 2013.
- [9] Shi-Lu Dai, Shude He: *Adaptive Tracking Control of Underactuated Surface Vessels With Model Uncertainties*, School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China, 2018.
- [10] Xiaogong Lin, Huai Jiang, Jun Nie and Yuzhao Jiao: *Adaptive-sliding-mode trajectory tracking control for underactuated surface vessels based on NDO*. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, Changchun, China, pp.1043-1049, 2018.
- [11] Cheng Liu, Zaojian Zou and Jianchuan Yin: *Trajectory tracking of underactuated surface vessels based on neural network and hierarchical sliding mode*. Journal of Mar Sci Technol, pp. 322-330, 2015.

---

Ngày nhận bài: 22/4/2019

Ngày nhận bản sửa: 14/5/2019

Ngày duyệt đăng: 16/5/2019