

**ỔN ĐỊNH HƯỚNG ĐI TÀU THỦY
DỰA TRÊN ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO THEO MÔ HÌNH
SHIP COURSE STABILITI BASED ON MODEL PREDICTIVE CONTROL
NGUYỄN HỮU QUYỀN*, TRẦN ANH DŨNG**

*Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email liên hệ: nguyenhuuquyenhd@gmail.com

Tóm tắt

Bài báo đề cập tới vấn đề phân tích mô hình toán tàu thủy 3 bậc tự do (3 DOF) trên mặt phẳng ngang. Nghiên cứu các thuật toán điều khiển dự báo theo mô hình cho hệ tuyến tính và hệ song tuyến. Trên cơ sở đó ứng dụng bộ điều khiển dự báo theo mô hình MPC (Model Predictive Control) để điều khiển ổn định, bám hướng đi đặt cho hệ thống lái tàu thủy.

Từ khóa: Điều khiển dự báo theo mô hình, mô hình tàu tuyến tính, phi tuyến, ổn định hướng đi.

Abstract

The article refers to the problem of analysis the three degrees of freedom (3 DOF) on horizontal plane. Research the model predictive control algorithms for linear and bilinear system. On that basis, application the predictive controller model MPC to control stability, tracking to set course for ship navigation system.

Keywords: Model Predictive Control (MPC), Linear and Non-linear vessel models, Ship course stability.

1. Giới thiệu

Tổng quan các phương pháp thiết kế bộ điều khiển tàu theo quỹ đạo và hướng đi trong những năm gần đây, là rất phong phú như: điều khiển tuyến tính: LQR, LQG,... điều khiển phi tuyến: Backstepping, trượt, điều khiển mặt động kết hợp với điều khiển Mờ hay Nơron [3, 4],...

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, được sử dụng phổ biến nhất trong điều khiển quá trình vì công thức, thuật toán của MPC bao gồm cả điều khiển tối ưu, điều khiển các quá trình ngẫu nhiên, điều khiển các quá trình có trễ, điều khiển khi biết trước quỹ đạo đặt. 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 [2]. Mô hình toán mô tả động học tàu thủy là mô hình phi tuyến liên tục và có thể chuyển thành mô hình song tuyến khi tiến hành rời rạc hóa. Mô hình toán cho thấy tàu thủy là đối tượng có tính chất động học như: quá trình dao động, thời gian quá độ dài, độ dự trữ ổn định thấp. Tín hiệu điều khiển có quán tính trễ lớn bị giới hạn (chặn) bởi sự đáp ứng không cho phép của cơ cấu thực hiện. Do vậy việc áp dụng bộ điều khiển MPC cho điều khiển tàu thủy là một phương pháp có thể đáp ứng các yêu cầu đặt ra trong điều khiển chuyển động tàu thủy và để kiểm tra khả năng kháng nhiễu của bộ điều khiển, bộ điều khiển MPC phản hồi trạng thái được đưa ra trong bài báo.

2. Mô hình toán chuyển động tàu thủy

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 ngang được đặc trưng bởi: $\vartheta = [u \ v \ r]^T$ lần lượt là tốc độ trượt dọc, ngang, quay trở. $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ 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 [3] như sau:

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

Trong đó: $M, C(\vartheta), D(\vartheta), \tau, J(\eta)$ 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 δ) và ma trận trực giao.

a. *Mô hình điều động phi tuyến* [3].

Giả thiết rằng tốc độ tàu là tiến và $u = u_0 \approx constant$ (tốc độ tàu không đổi), tàu được điều khiển hướng bằng một bánh lái đơn phía sau lái. Mô hình lúc này gồm các biến trạng thái là $\vartheta = [v \ r]^T$. Mối quan hệ giữa hướng đi (ψ) và tốc độ thay đổi hướng đi là $\dot{\psi} = r$. Bằng cách đưa thêm biến trạng thái hướng đi (ψ) vào phương trình (1) và biến đổi ta có được mô hình điều động tàu phi tuyến có dạng như sau:

$$M\dot{\vartheta} + N(\vartheta, u_0)\vartheta = b\delta \quad (2)$$

Trong đó: $\vartheta = [v, r, \psi]^T, M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 \\ mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} -Y_{\delta} \\ -N_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix}$

Với m - là khối lượng tàu, x_g - là tọa độ trọng tâm tàu theo trục hướng mũi tàu (trục x), I_z mômen quán tính trên z (hướng theo chiều thẳng đứng), các thông số: Y_v, N_r, Y_r được ký hiệu theo SNAME (1950) [4] ví dụ như sau: $Y = -Y_v \dot{v}$, trong đó $Y_v := \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}$, và Y_δ, N_δ là hệ số lực và mômen.

Giả thiết ma trận giảm chấn thủy động lực học $D(\vartheta)$ có thành phần phi tuyến, khi đó ma trận $N(\vartheta, u_o)$ được tính như sau:

$$N(\vartheta, u_o) = \begin{bmatrix} -Y_v - Y_{|v|v}|v| - Y_{|r|v}|r| & (m - X_{\dot{u}})u_o - Y_r - Y_{|v|r}|v| - Y_{|r|r}|r| & 0 \\ (X_{\dot{u}} - Y_v)u_o - N_v - N_{|v|v}|v| - N_{|r|v}|r| & (mx_g - Y_r)u_o - N_r - N_{|v|r}|v| - N_{|r|r}|r| & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Các phần tử trong ma trận $N(\vartheta, u_o)$ được ký hiệu theo SNAME (1950) [4].

b. Mô hình điều động tuyến tính [3].

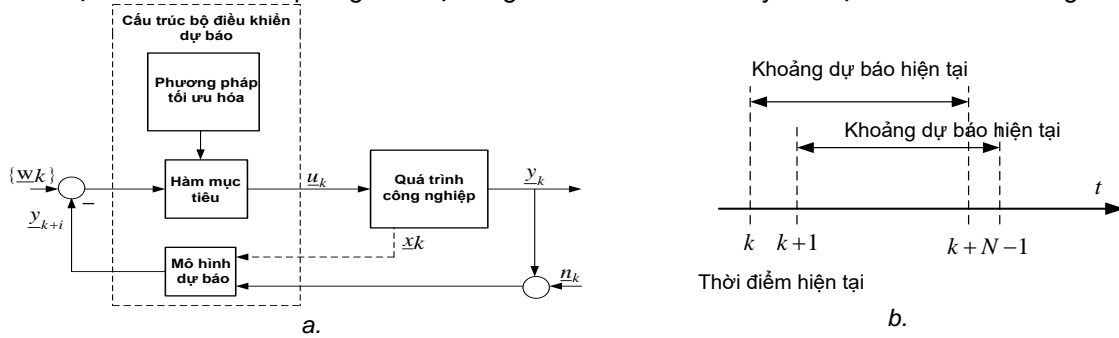
Mô hình điều động tuyến tính dựa trên giả thiết rằng tốc độ tiến và $u = u_o \approx constant$ (tốc độ tàu không đổi) và v và r được giả thiết là nhỏ, tàu được điều khiển hướng bằng một bánh lái đơn. Các thành phần phi tuyến trong các ma trận $C(\vartheta), D(\vartheta)$ được bỏ qua. Từ (2) mô hình điều động tuyến tính được viết dưới dạng sau:

$$M\dot{\vartheta} + N(u_o)\vartheta = b\delta \tag{3}$$

3. Hệ điều khiển dự báo

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

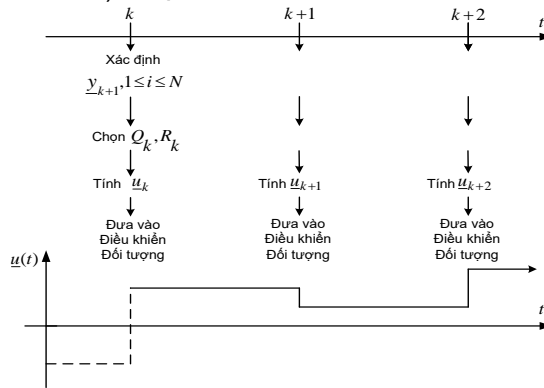
Khâu mô hình dự báo: Khâu này có nhiệm vụ xác định tín hiệu ra tương lai y_{k+i} tính từ thời điểm hiện tại k . $y_{k+i} = y_{k+i}(u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1})$

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 làm việc bộ điều khiển dự báo

Bản chất của bộ điều khiển dự báo là hoạt động theo nguyên tắc vòng lặp trượt dọc trên trục thời gian (receding horizon control), được mô tả như Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý trượt dọc theo trục thời gian của bộ điều khiển dự báo

4. Xây dựng bộ điều khiển theo mô hình dự báo ổn định hướng đi tàu thủy

a. Xây dựng bộ điều khiển theo mô hình dự báo tuyến tính cho điều khiển hướng đi tàu thủy

Xét đối tượng điều khiển có mô hình $\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C\underline{x}_k + \underline{v}_k \end{cases}$ với \underline{v}_k là nhiễu tác động (4)

Bài toán đặt ra là xây dựng bộ điều khiển dự báo để tín hiệu ra \underline{y}_k bám theo tín hiệu đặt mẫu \underline{w}_k . Từ mô hình (4) có được các đầu ra dự báo $\underline{y}_{k+i}, i = 1, 2 \dots N$ (trong đó N là cửa sổ dự báo, tức là số tín hiệu ra được dự báo trong một chu kỳ lặp điều khiển) tính từ thời điểm hiện tại như sau: (với giả thiết nhiễu là biến đổi chậm để có thể xem là hằng số trong cửa sổ dự báo hiện tại):

$$\underline{y}_{k+i} = CA^i \underline{x}_k + CA^{i-1} B \underline{u}_k + \dots + CAB \underline{u}_{k+i-2} + CB_k \underline{u}_{k+i-1} + \underline{v}'_k \quad (5)$$

Với \underline{v}'_k là ước lượng của nhiễu. Viết chung lại thành vector đầu ra dự báo thuộc cửa sổ dự báo hiện tại thì:

$$\begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{v}'_k \\ \vdots \\ \underline{v}'_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^N \end{pmatrix} \underline{x}_k + \begin{pmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \dots & CB \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{u}_k \\ \vdots \\ \underline{u}_{k+N-1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \underline{y} = \underline{d} + \underline{F}u$$

Sử dụng hàm mục tiêu dạng toàn phương cho mọi thời điểm k ta có được hàm mục tiêu như sau:

$$J_k = (\underline{y} - \underline{\omega})^T Q_k (\underline{y} - \underline{\omega}) + \underline{u}^T R_k \underline{u} \text{ với } \underline{\omega} = \text{col}(\underline{\omega}_{k+1}, \underline{\omega}_{k+2}, \dots, \underline{\omega}_{k+N})$$

Và Q_k, R_k là hai ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn, có được:

$$\underline{u} = (F^T Q_k F + R_k)^{-1} F^T Q_k (\underline{\omega} - \underline{d}) \text{ và } \underline{u}_k = (I, 0, \dots, 0) \underline{u} \quad (7)$$

Từ những phân tích ở trên ta tổng quát lại được thuật toán điều khiển dự báo cho mô hình tuyến tính (thuật toán 1) bao gồm các bước sau:

Thuật toán 1, [1,2]:

1. Chọn cửa sổ dự báo $N \geq 2$. Xây dựng ma trận F từ tham số mô hình theo (6), gán $k = 0$;
2. Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q_k, R_k . Đo $\underline{x}_k, \underline{y}_k$ xác định \underline{v}'_k và từ đó tính vector

\underline{d} theo (6);

3. Tính \underline{u} và \underline{u}_k theo (7) rồi đưa \underline{u}_k vào điều khiển đối tượng trong khoảng thời gian trích mẫu;
4. Gán $k = k + 1$ và quay về bước 2.

Từ thuật toán trên để xây dựng bộ điều khiển dự báo cho đối tượng có mô hình tuyến tính như (3) thì ta phải đưa phương trình (3) về dạng (4) sau đó áp dụng thuật toán điều khiển 1 và đưa thêm khâu tích phân vào bộ điều khiển. Phương trình (3) được biến đổi bằng cách đặt biến $\underline{z} = \underline{x}, u = \delta$, ta có được phương trình mới theo (8):

$$\dot{\underline{x}} = -M^{-1}N(u_0)\underline{x} + b\underline{u} \quad (8)$$

Quá trình rời rạc hóa thông qua $\underline{x} = \frac{\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_k}{T}$ với T là chu kỳ trích mẫu, khi đó phương trình (1.8) trở thành:

$$\underline{x}_{k+1} = (I + T(-M^{-1}N(u_0)))\underline{x}_k + T b \underline{u} \quad (9)$$

Đặt: $A_k = I + T(-M^{-1}N(u_0))$ và $T.b = B_k, \underline{y}_k = \underline{x}$

Khi đó phương trình (9) có dạng như (4), và chúng ta áp dụng thuật toán 1 để thiết kế bộ điều khiển dự báo cho mô hình tuyến tính.

b. Xây dựng bộ điều khiển theo mô hình dự báo phi tuyến cho điều khiển hướng đi tàu thủy.

Xét đối tượng điều khiển có mô hình:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + \underline{v}_k \end{cases} \quad (10)$$

Với nhiễu \underline{v}_k là hằng bất định hoặc hàm biến đổi chậm. Trong đó $A(\underline{x}_k), B(\underline{x}_k), C(\underline{x}_k)$ đều phụ thuộc trạng thái, khi đó hệ (10) được gọi là hệ song tuyến. Nhiệm vụ điều khiển là xây dựng bộ điều khiển phản hồi trạng thái để có tín hiệu ra \underline{y}_k bám theo tín hiệu đặt $\underline{w}_k, \underline{y}_k \rightarrow \underline{w}_k$ với $\{\underline{w}_k\}$ là dãy tín hiệu mẫu đặt cho trước. Từ mô hình trên thì ở thời điểm k hiện tại và trong toàn bộ cửa sổ dự báo $[k, k + N]$ tương ứng, khi đã có $\underline{x}_k, \underline{y}_k$ (đo được), đối tượng sẽ mô tả xấp xỉ được bởi mô hình LTI (Linear Time-Invariant).

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + \underline{v}_k \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó: $A_k = A(\underline{x}_k), B_k = B(\underline{x}_k), C_k = C(\underline{x}_k)$. Bởi vậy ta lại có được: $\underline{y} = \underline{F}u + \underline{d}$, với:

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_{k+1} \\ \vdots \\ y_{k+N} \end{pmatrix}, \underline{d} = \begin{pmatrix} v'_k \\ \vdots \\ v'_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{C}\hat{A} \\ \vdots \\ \hat{C}\hat{A}^N \end{pmatrix} \underline{x}_k, \underline{x}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}, \underline{u} = \begin{pmatrix} \Delta u_k \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Và các ma trận $F, \hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ được xác định như sau:

$$F = \begin{pmatrix} \hat{C}\hat{B} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{C}\hat{A}^{N-1}\hat{B} & \hat{C}\hat{A}^{N-2}\hat{B} & \dots & \hat{C}\hat{B} \end{pmatrix}, \hat{A} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ 0 & I \end{pmatrix}, \hat{B} = \begin{pmatrix} B_k \\ I \end{pmatrix}, \hat{C} = (C_k, 0) \quad (13)$$

Hàm mục tiêu và tối ưu hóa: sử dụng hàm mục tiêu dạng toàn phương cho mọi thời điểm k tín hiệu điều khiển sẽ được tính như sau:

$$\underline{u} = (F^T Q_k F + R_k)^{-1} F^T Q_k (\underline{\omega} - \underline{d}) \quad \text{và} \quad \underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + (I, 0, \dots, 0) \underline{u} \quad (14)$$

Từ những phân tích ở trên ta tổng quát lại được thuật toán điều khiển dự báo cho mô hình song tuyến (thuật toán 2) bao gồm các bước sau:

Thuật toán 2, [1, 2]:

1. Chọn cửa sổ dự báo $N \geq 2$ Gán $k = 0, u_{-1} = 0,$
2. Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương $Q_k, R_k.$ Đo các biến trạng thái $\underline{x}_k, y_k,$ xác định các ma trận tham số A_k, B_k, C_k và từ đó xác định $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, F$ theo (13) và xác định $v'_k, z_k,$ sau đó tính vectơ \underline{d} theo (13),

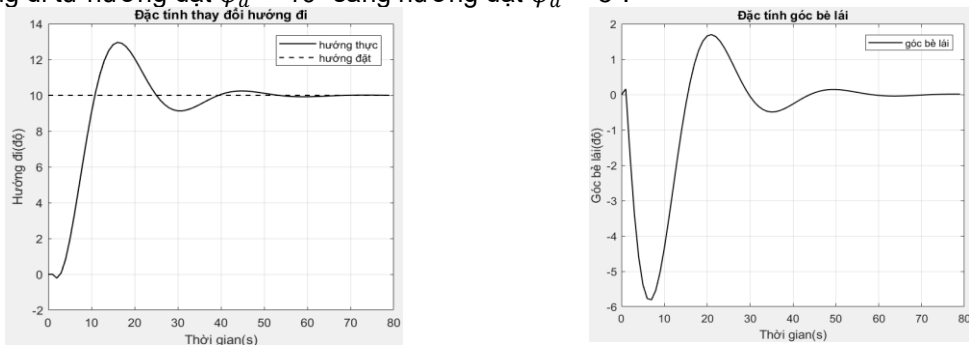
3. Tính \underline{u} và \underline{u}_k theo (14) rồi đưa \underline{u}_k vào điều khiển đối tượng trong khoảng thời gian trích mẫu,
4. Gán $k = k + 1$ và quay về bước 2,

Từ thuật toán ở trên để xây dựng bộ điều khiển dự báo cho đối tượng có mô hình song tuyến (2) thì chúng ta phải đưa phương trình (2) về dạng (10) sau đó áp dụng thuật toán điều khiển 2.

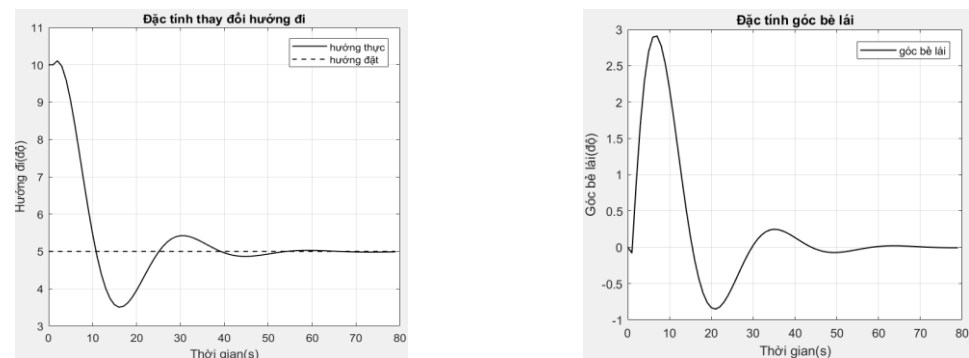
c. Mô phỏng kiểm chứng bộ điều khiển

Trường hợp 1: Bộ điều khiển theo mô hình dự báo tuyến tính điều khiển bám hướng đi đặt.

Số liệu ma trận tham số mô phỏng M,b được lấy từ thông số tàu CyberShip II trong [3]. Bộ điều khiển được tạo ra theo thuật toán điều khiển 1, trong đó cửa sổ dự báo chọn $N = 4, R = I, Q = 3R.$ Giả định tàu chuyển động với tốc độ không đổi 8,5 Knots, nhiều tác động phân bố đều, biến đổi chậm trong 2 trường hợp. thay đổi hướng đi từ hướng đặt $\psi_d = 0^\circ$ sang hướng đặt $\psi_d = 10^\circ$ và thay đổi hướng đi từ hướng đặt $\psi_d = 10^\circ$ sang hướng đặt $\psi_d = 5^\circ.$

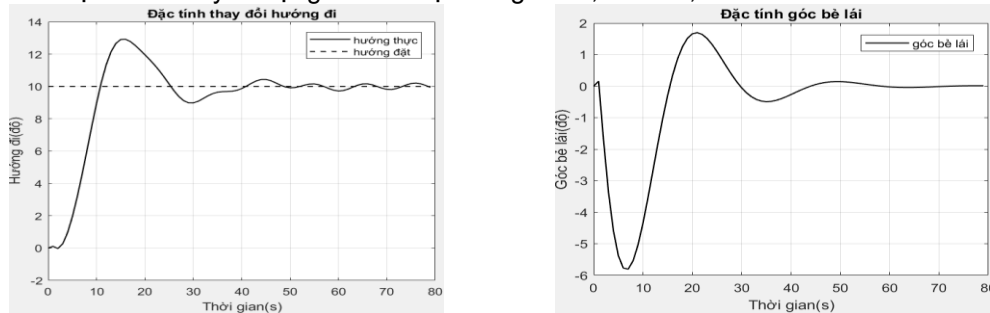


Hình 3. Đặc tính hướng đi và góc bề lái khi thay đổi hướng đi từ hướng đặt $\psi_d = 0$ sang $\psi_d = 10$

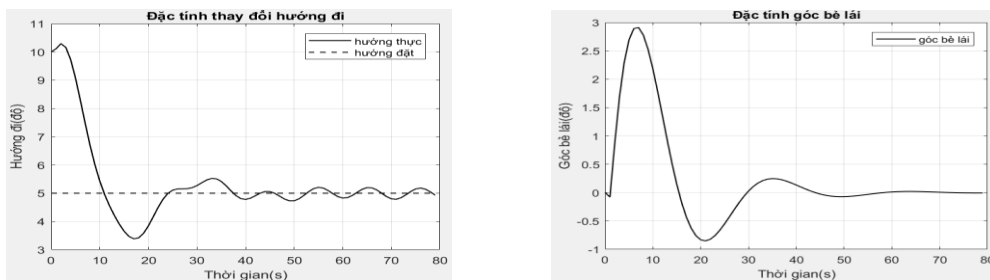


Hình 4. Đặc tính hướng đi và góc bề lái khi thay đổi hướng đi từ hướng $\psi_d = 10$ sang $\psi_d = 5$

Trường hợp 2 bộ điều khiển theo mô hình dự báo phi tuyến điều khiển bám hướng đi đặt. Bộ điều khiển được tạo ra theo thuật toán điều khiển 2, trong đó cửa sổ dự báo chọn $N = 5$, $R = I$, $Q = 4R$. Giả định tàu chuyển động với tốc độ không đổi 8,5 Knots,



Hình 5. Đặc tính hướng đi và góc bề lái khi thay đổi hướng đi từ hướng $\psi_d = 0$ sang $\psi_d = 10$



Hình 6. Đặc tính hướng đi và góc bề lái khi thay đổi hướng đi từ hướng $\psi_d = 10$ sang $\psi_d = 5$

5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng thuật toán cho bộ điều khiển theo mô hình dự báo trong việc điều khiển bám theo hướng đi đặt trong hệ thống lái cho mô hình tàu là tuyến tính và mô hình phi tuyến. Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy đặc tính đầu ra (hướng đi) đáp ứng bám tốt tín hiệu hướng đi đặt trong cả mô hình tuyến tính và phi tuyến. Đặc tính cơ cấu thực hiện (góc bề lái) đảm bảo yêu cầu nằm trong giá trị cho phép so với thực tế và bộ điều khiển MPC có khả năng kháng nhiễu.

Những nội dung sẽ tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện bộ điều khiển là: xây dựng bộ điều khiển dự báo điều khiển bám theo quỹ đạo và hướng đi đặt khi tốc độ tàu thay đổi, các tham số trong mô hình tàu thay đổi phụ thuộc vào tốc độ tàu (mô hình tàu có thêm thành phần bất định). Đưa thêm bộ quan sát trạng thái để ước lượng nhiễu và chuyển thành bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra.

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] Fossen, T.I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and sons, 1994.
- [4] Perez, T. and Mogens Blanke. *Mathematical Ship Modeling for Control Applications*. Technical Report Dept. of Electrical and Computer Engineering The University of Newcastle, 2002.
- [5] Maciejowski, M.J.: *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, 2011.

Ngày nhận bài: 21/02/2019
 Ngày nhận bản sửa: 05/03/2019
 Ngày duyệt đăng: 13/03/2019