

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY BẢM QUỲ ĐẠO ĐẶT DỰA THEO NGUYÊN LÝ RHC TRÊN NỀN LQR

DESIGNING TRAJECTORY SHIP MOTION CONTROLLER BASED ON RECEDING HORIZON CONTROL WITH LQR

Nguyễn Hữu Quyền, Trần Anh Dũng
Đại học Hàng hải Việt Nam

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 (3 DOF) trên mặt phẳng ngang. Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy theo quỹ đạo dựa theo nguyên lý tối ưu RHC (Receding Horizon Control) trên nền LQR (Linear Quadratic Regulator) thông qua việc tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc theo trục thời gian cho đối tượng tàu thủy ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành với mô hình phi tuyến.

Từ khóa: Mô hình tàu phi tuyến thiếu cơ cấu chấp hành, điều khiển tối ưu RHC trên nền LQR, tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc theo trục thời gian.

Chỉ số phân loại: 2.2

Abstract: The article refers to the problem of analysis the three degrees of freedom (3 DOF) underactuated mathematic ship model on horizontal plane. Researching, designing trajectory motion controller ship based on Receding Horizon Control LQR by the linearization each model segment along the time axis for Non-linear 3 DOF underactuated vessel models.

Keyword: Non-linear underactuated vessel models, Optimal Receding Horizon Control with LQR, linearization each model segment along the time axis.

Classification number: 2.2

1. Giới thiệu

Tàu thủy là đối tượng có tính phi tuyến lớn, hoạt động trong môi trường chịu tác động của nhiều ngẫu nhiên như sóng, gió, dòng chảy... Tổng quan các phương pháp thiết kế bộ điều khiển chuyển động theo quỹ đạo và hướng đi trong những năm gần đây là rất phong phú, như sử dụng các bộ điều khiển phi tuyến: Backstepping, trượt SMC (Sliding Mode Control), điều khiển mặt động DSC (Dynamic Surface Control) kết hợp với điều khiển mờ Fuzzy hoặc Neron, điều khiển thích nghi [2,7]... các phương pháp điều khiển phi tuyến trên đều dựa trên việc tổng hợp hàm điều khiển Lyapunov tuy nhiên việc xác định hàm điều khiển Lyapunov là rất phức tạp và luôn là một thách thức trong thiết kế điều khiển [2].

Như vậy phương án đơn giản hóa các bước tính toán khi thiết kế bộ điều khiển được đặt ra. Bộ điều khiển theo nguyên lý RHC (Receding Horizon Control) trên nền LQR là một phương pháp thiết kế bộ điều khiển theo nguyên tắc trượt dọc trên trục thời gian của bộ điều khiển LQR, tức là bộ điều khiển LQR có tham số biến đổi theo thời gian [1,4]. Mô hình

toán mô tả chuyển động tàu thủy với ba bậc tự do trong mặt phẳng ngang được đưa về dạng mô hình song tuyến (dạng mô hình có các tham số phụ thuộc vào trạng thái của đối tượng). Thông qua việc tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dọc theo trục thời gian của đối tượng phi tuyến để xây dựng bộ điều khiển LQR cho đối tượng phi tuyến tàu thủy. Để nâng cao chất lượng bộ điều khiển RHC – LQR cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy, bài báo đã sử dụng kỹ thuật nâng cao tốc độ hội tụ của sai lệch bám nhờ hiệu chỉnh tín hiệu đặt theo nguyên lý học lặp IL (Iterative Learning) [8]. Do đó thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu bám quỹ đạo đặt theo nguyên lý RHC trên nền tối ưu LQR sẽ đáp ứng nâng cao chất lượng điều khiển chuyển động tàu thủy.

2. Mô hình mô tả 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. Mô tả chuyển động tàu thủy 3 bậc tự do, xét trong mặt 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. Được mô tả như hình vẽ 1.

Phương trình mô tả chuyển động tàu thủy 3 bậc tự do được đưa ra trong [2] 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:

$M, C(\underline{v}), D(\underline{v}), \underline{\tau}, J(\underline{\eta})$ lượt là ma trận quán tính là ma trận Coriolis và hướng tâm, ma trận giảm chấn thủy động lực học và ma trận trực giao được xác định như sau:

$$M = M_A + M_{RB} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mX_g - y_f \\ 0 & mX_g - y_f & I_z - N_f \end{bmatrix}$$

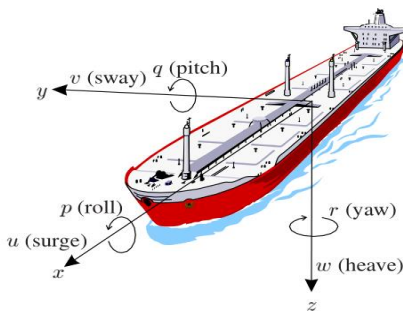
$$C(\underline{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ m(x_g r + v) - Y_v v - Y_r r & -mu + X_u u & -m(x_g r + v) + Y_v v + Y_r r \\ mu - X_u u & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D(\underline{v}) = D + D_n(\underline{v}), \quad D = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix},$$

$$D_n(\underline{v}) = \begin{bmatrix} X_{|u|} |u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|} |v| + Y_{|r|} |r| & Y_{|v|} |v| \\ 0 & N_{|v|} |v| + N_{|r|} |r| & N_{|v|} |v| + N_{|r|} |r| \end{bmatrix}$$

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

Véc tơ của lực và mô men điều khiển (bao gồm lực tác động của chân vịt và góc bánh lái δ) và ma trận trực giao, $\underline{\tau}_w$ là nhiễu tác động.



Hình 1. Mô tả thành phần chuyển động, các thông số động học của chuyển động tàu thủy.

2.1. Mô hình tàu ba bậc tự do đủ cơ cấu chấp hành

Theo Fossen [3] mô hình tàu 3 bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang có mô hình toán như (1), nếu thành phần lực tác động $\underline{\tau}$ có đầy đủ các thành phần: tức $\underline{\tau} = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ và $\underline{v} = [u \ v \ r]^T$ thì mô hình toán xét trên mặt phẳng ngang được gọi là mô hình tàu đủ cơ cấu chấp hành (*Full Actuated*). Đây là loại tàu mà có nhiều cơ cấu thực hiện như: Chân vịt chính sau lái tạo ra lực đẩy trượt dọc, chân vịt ngang hai bên mạn tạo ra lực trượt ngang, bánh lái chính sau lái tạo ra mô men thay đổi hướng đi của tàu. Mô hình này thường thấy trong các loại tàu công trình, tàu phục vụ nhiệm vụ đặc biệt trên biển [2]... mô hình này thường được áp dụng khi nghiên cứu về điều khiển ổn định động DP (*Dynamic Position*) cho tàu thủy [2].

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

2.2. Mô hình tàu ba bậc tự do thiếu cơ cấu chấp hành

Mặt khác nếu trong (2) lực điều khiển $\underline{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$, 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*) [2]. 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 tàu không đạt ngang trong quá trình chuyển động. Bởi vì trong mô hình toán tàu thiếu cơ cấu chấp hành trình bày dưới đây (theo phương trình (3)) tác động đạt ngang được tạo ra bởi thành phần u, r). Đây là loại tàu mà chỉ có hai cơ cấu thực hiện là chân vịt chính và bánh lái chính sau lái. Giả sử rằng tàu không có chân vịt mũi và nếu có thì chân vịt mũi chỉ hoạt động ở chế độ khi tàu điều động ra vào cảng. Điều này không làm mất đi tính tổng quát của phương toán hệ thiếu cơ cấu chấp hành đối với tàu thủy. Mô hình toán này thường gặp phổ biến là các tàu chở hàng, tàu Container [3]... 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 [6]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M\dot{\underline{v}} + C(\underline{v})\underline{v} + D(\underline{v})\underline{v} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{\tau}_w \\ \underline{\tau} = [\tau_u \quad 0 \quad \tau_r]^T \end{cases} \quad (3)$$

3. Bộ điều khiển tối ưu RHC trên nền LQR

Bộ điều khiển tối ưu RHC trên nền LQR thực chất là bộ điều khiển LQR có tham số biến đổi trượt dọc trên trục thời gian áp dụng cho lớp đối tượng phi tuyến có mô hình dạng song tuyến như (4).

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B(\underline{x})\underline{u} \\ \underline{y} = C(\underline{x})\underline{x} \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: $A(\underline{x}), B(\underline{x}), C(\underline{x})$ là các ma trận phụ thuộc vào trạng thái mô hình đối tượng.

Để tránh phải việc tìm nghiệm bài toán điều khiển tối ưu phi tuyến, thường rất phức tạp, thậm chí trong nhiều trường hợp không thể có được nghiệm tường minh. Do đó kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn dọc trên trục thời gian mô hình song tuyến (4) của hệ tại các điểm $t_k, k = 0, 1, \dots$ với $t_0 = 0$ cho hệ tiền định (4) được áp dụng, rồi sau đó áp dụng phương pháp điều khiển tối ưu tuyến tính cũng từng đoạn trên trục thời gian. Phương pháp điều khiển tối ưu tuyến tính được áp dụng ở đây sẽ là phương pháp biến phân (variation calculus). Hình 2 biểu diễn minh họa kỹ thuật này.

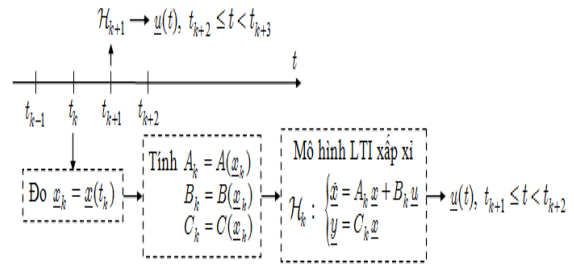
3.1. Mô hình tuyến tính từng đoạn dọc theo trục thời gian

Giả sử ở thời điểm t_k hiện tại ta đo được trạng thái $\underline{x}_k = \underline{x}(t_k)$ của hệ. Khi đó, trong khoảng thời gian rất ngắn kế tiếp $t_k \leq t < t_{k+1}$ và nếu như tất cả các phần tử của ma trận $A(\underline{x}), B(\underline{x})$ cũng như của $C(\underline{x})$ là những hàm liên tục, thì hiển nhiên mô hình song tuyến (4) sẽ xấp xỉ được bởi mô hình tuyến tính tham số hằng (LTI: Linear Time Invariant) [5].

$$\mathcal{H}_k: \begin{cases} \dot{\underline{x}} = A_k \underline{x} + B_k \underline{u} \\ \underline{y} = C_k \underline{x} \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó:

$$A_k = A(\underline{x}_k), B_k = B(\underline{x}_k), C_k = C(\underline{x}_k) \quad (6)$$



Hình 2. Ý nghĩa của việc tuyến tính hóa từng đoạn mô hình song tuyến.

Như vậy, dọc theo quỹ đạo trạng thái $\underline{x}(t)$ sau này, hệ song tuyến (4) đã được thay thế bằng dãy vô hạn các hệ LTI $\mathcal{H}_k, k = 0, 1, \dots$ cho ở công thức (5) và (6). Nói cách khác, ở đây có: $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathcal{H}_k = (4)$

3.2. Bộ điều khiển LQR trượt dọc trên trục thời gian

Sau khi đã có được mô hình LTI $\mathcal{H}_k$ xấp xỉ cho hệ song tuyến (4) ở các công thức (5), (6) thì tiếp theo ta sẽ xây dựng bộ điều khiển tối ưu LQR phản hồi trạng thái, ký hiệu là $\mathcal{R}_k$ để đầu ra $\underline{y}$ của hệ $\mathcal{H}_k$ bám theo được tín hiệu hằng $\underline{w}_k = \underline{w}(t_k)$.

Bộ điều khiển $\mathcal{R}_k$ này, khi được sử dụng để điều khiển hệ song tuyến ban đầu (4) thì cũng sẽ chỉ được sử dụng ở khoảng thời gian $t_{k+1} \leq t < t_{k+2}$, còn ở khoảng thời gian $t_k \leq t < t_{k+1}$ trước đó nó được điều khiển bởi $\mathcal{R}_{k-1}$. Như vậy khoảng thời gian chênh lệch $\delta_k = t_{k+1} - t_k$ sẽ chính là khoảng thời gian cần thiết để xác định được $\mathcal{R}_k$. Với khả năng tốc độ xử lý hiện nay của các bộ điều khiển số để tìm $\mathcal{R}_k$ thì δ_k sẽ là rất nhỏ, do đó sai số giữa $\mathcal{H}_k$ và hệ song tuyến (4) cũng là vô cùng bé [1,4,5].

Để tăng tốc độ bám tín hiệu đặt cho bộ điều khiển $\mathcal{R}_k$, ta có thể áp dụng nguyên tắc học lặp, tức là thay vì chỉ bám theo tín hiệu đặt $\underline{w}_k = \underline{w}(t_k)$, ta sẽ xây dựng $\mathcal{R}_k$ để đầu ra $\underline{y}$ của hệ $\mathcal{H}_k$ bám theo được tín hiệu đặt mới $\underline{r}_k$ có bù thêm sai lệch của $\mathcal{R}_{k-1}$ trước đó như sau:

$$\underline{r}_k = \underline{w}_k - K\underline{e} \quad (7)$$

Với $\underline{e} = \underline{y}_{k-1} - \underline{w}_{k-1}$ và $0 < K < 1$, trong đó $\underline{y}_{k-1} = \underline{y}(t_{k-1})$ là tín hiệu đầu ra đo được của hệ tại thời điểm t_{k-1} .

Tiếp theo sẽ là xây dựng bộ điều khiển $\mathcal{R}_k$ cho hệ LTI H_k mô tả bởi (5), sao cho đầu ra $\underline{y}$ của nó bám theo được $\underline{r}_k$. Công cụ để giải quyết việc này sẽ là phương pháp biến phân. Nhưng vì phương pháp biến phân lại chỉ giúp tìm được bộ điều khiển làm hệ ổn định tối ưu, nên trước khi xác định $\mathcal{R}_k$ nhờ biến phân, ta sẽ làm động tác chuyển hệ về gốc tọa độ mới là các giá trị xác lập $\underline{x}_s[k]$, $\underline{u}_s[k]$ của hệ. Đó là những giá trị thỏa mãn:

$$\begin{pmatrix} \underline{0} \\ \underline{r}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x}_s[k] \\ \underline{u}_s[k] \end{pmatrix} = F_k \begin{pmatrix} \underline{x}_s[k] \\ \underline{u}_s[k] \end{pmatrix}$$

$$\text{Với } F_k = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ C_k & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Suy ra:

$$\begin{pmatrix} \underline{x}_s[k] \\ \underline{u}_s[k] \end{pmatrix} = F_k^{-1} \begin{pmatrix} \underline{0} \\ \underline{r}_k \end{pmatrix} \quad (9)$$

Sau khi đã có được giá trị xác lập $\underline{x}_s[k]$, $\underline{u}_s[k]$ thì khi đặt các biến mới:

$$\underline{z} = \underline{x} - \underline{x}_s[k], \quad \underline{v} = \underline{u} - \underline{u}_s[k] \quad (10)$$

Mô hình (5) của H_k được chuyển thành:

$$\mathcal{H}_k' : \dot{\underline{z}} = A_k \underline{z} + B_k \underline{v} \quad (11)$$

Và nhiệm vụ điều khiển bám cho hệ $\mathcal{H}_k$ được chuyển thành điều khiển ổn định hệ $\mathcal{H}_k'$.

Để điều khiển ổn định tối ưu hệ $\mathcal{H}_k'$, ta sử dụng hàm mục tiêu.

$$J_k(\underline{u}) = \frac{1}{2} \int_{t_k}^{\infty} (\underline{z}^T Q_k \underline{z} + \underline{u}^T R_k \underline{u}) dt \rightarrow \min_{\underline{u}} \quad (12)$$

có hai ma trận đối xứng, xác định dương Q_k, R_k tùy chọn. Khi đó, nhờ phương pháp biến phân sẽ được nghiệm tối ưu là:

$$\underline{v} = -R_k^{-1} B_k^T S_k \underline{z} \quad (13)$$

Với $S_k B_k R_k^{-1} B_k^T S_k - S_k A_k - A_k^T S_k = Q_k$ và $S_k = S_k^T > 0$

Suy ra, bộ điều khiển $\mathcal{R}_k$ cần tìm là:

$$\mathcal{R}_k : \underline{u}(t) = \underline{u}_s[k] - R_k^{-1} B_k^T S_k (\underline{x} - \underline{x}_s[k]) \quad (14)$$

Và nó sẽ được sử dụng để điều khiển hệ song tuyến (4) cho ban đầu trong khoảng thời gian $t_{k+1} \leq t < t_{k+2}$. Khoảng thời gian $\delta_k = t_{k+1} - t_k$ kể từ lúc đo được trạng thái $\underline{x}_k = \underline{x}(t_k)$ của hệ cho tới khi có được tín hiệu điều khiển tối ưu $\underline{u}(t)$, $t_{k+1} \leq t < t_{k+2}$ chính là khoảng thời gian cần thiết để thực hiện các phép tính (6), (7), (9), (13) và (14). Chúng sẽ được thực hiện lặp với $k = 0, 1, \dots$

4. Thiết kế bộ điều khiển chuyển động tàu thủy theo quỹ đạo dựa theo nguyên lý RHC trên nền LQR

Ta thấy rằng ở mô hình (3) của mô hình chuyển động tàu thủy ba bậc tự do trên mặt phẳng ngang là một hệ song tuyến như sau:

$$M\dot{\underline{v}} + C_d(\underline{v})\underline{v} = F\underline{\tau} \quad \text{với } \underline{v} \in \mathbb{R}^3, \quad \underline{\tau} \in \mathbb{R}^2 \quad (15)$$

Trong đó:

$$C_d(\underline{v}) = C(\underline{v}) + D(\underline{v})$$

Đặt biến mới:

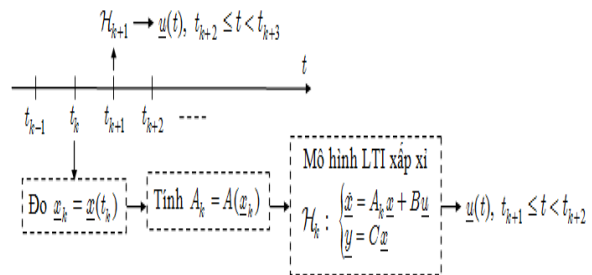
$$\underline{\tau} = \underline{u}, \quad \underline{v} = \underline{x}, \quad A(\underline{x}) = -M^{-1}C_d(\underline{v}), \quad (16)$$

$$B = M^{-1}F$$

Có được mô hình trạng thái chính tắc như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = A(\underline{x})\underline{x} + B\underline{u} \\ \underline{y} = C\underline{x} \end{cases} \quad (17)$$

Như vậy, đây là một hệ song tuyến. Do đó, phương pháp điều khiển RHC trên nền LQR đã trình bày ở trên được áp dụng để tín hiệu đầu ra $\underline{y} = \underline{v}$ của hệ (17) bám tiệm cận theo được quỹ đạo mẫu $\underline{w}(t)$ cho trước hay theo phương trình số một của (3) thì quỹ đạo chuyển động của tàu $\underline{\eta}$ bám theo quỹ đạo $\underline{\eta}_d$ (quỹ đạo đặt). Do mô hình song tuyến (17) chỉ có ma trận A phụ thuộc vào trạng thái do đó phương pháp RHC-LQR tổng quát đã được mô tả ở hình 1 bây giờ cũng trở nên đơn giản hơn như cho ở hình 3 sau đây.



Hình 3. Nội dung thuật toán RHC-LQR cho hệ chuyển động tàu thủy theo quỹ đạo.

Thuật toán RHC-LQR

i. Khởi tạo bằng việc gán $k = 0$ và khoảng trượt $T > 0$ nhỏ tùy ý, song không nhỏ hơn thời gian tính cho một vòng lặp. Xác định B, C từ hệ điều khiển (15) theo công thức (16);

ii. Đo $\underline{x}_k = \underline{x}(kT)$, tức là đo $\underline{v}_k = \underline{v}(kT)$ và tính $A_k = A(\underline{x}_k)$. Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương $Q_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ và $R_k \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$;

iii. Tính $\underline{x}_s[k]$, $\underline{u}_s[k]$ theo (9), tức là:

$$\begin{pmatrix} \underline{x}_s[k] \\ \underline{u}_s[k] \end{pmatrix} = F_k^{-1} \begin{pmatrix} \underline{0} \\ \underline{v}_d(kT) \end{pmatrix}, F_k = \begin{pmatrix} A_k & B \\ C & \mathbf{0} \end{pmatrix};$$

iv. Tính $\underline{v}$ theo (13) và $\mathcal{R}_k$ theo (14), tức là:

$$\mathcal{R}_k: \underline{u}(t) = \underline{u}_s[k] - R_k^{-1} B^T S_k (\underline{x} - \underline{x}_s[k])$$

trong đó S_k là nghiệm đối xứng xác định dương của:

$$S_k B R_k^{-1} B^T S_k - S_k A_k - A_k^T S_k = Q_k;$$

v. Đưa $\underline{u}(t)$ vào điều khiển hệ (17), với $\underline{\tau}(t) = \underline{u}(t)$, trong khoảng thời gian T .

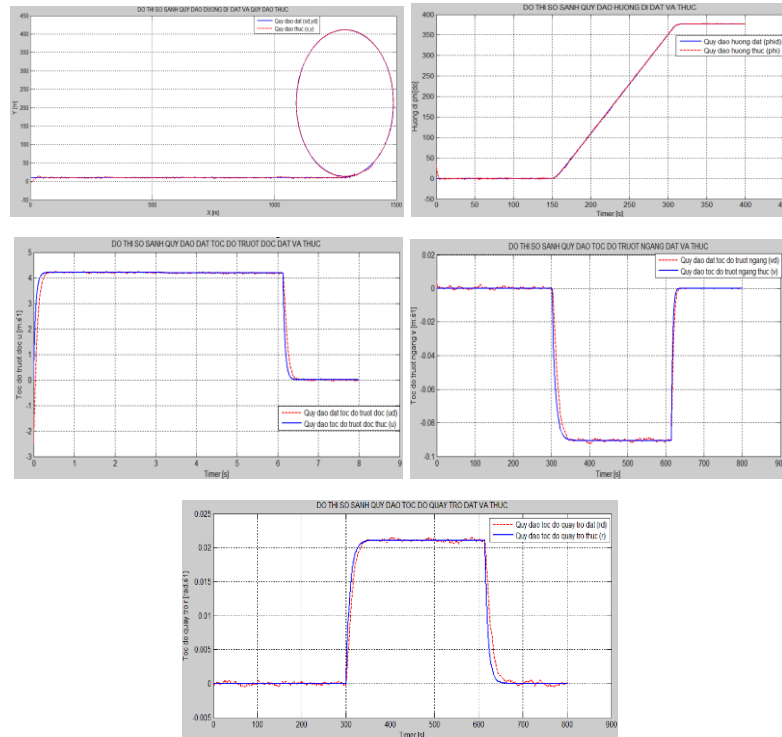
vi. Gán $k := k + 1$ rồi quay về 2.

5. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển

Chọn khoảng thời gian trượt $T=0.01$; ma trận xác định dương $Q=5 \cdot \text{eye}(3)$; $R=2 \cdot \text{eye}(2)$. Thông số ma trận M, C, D được lấy trong mô hình tàu tải liệu [7]. Quỹ đạo đặt (quỹ đạo tham chiếu) $\underline{\eta}_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]$ với $\underline{\eta}_d \rightarrow \underline{v}_d$ với $\underline{v}_d = [u_d \ v_d \ r_d]$ được tạo ra thỏa mãn mô hình động học (3), tức là phương trình

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}}_d = J(\underline{\eta}_d) \underline{v}_d \\ M \dot{\underline{v}}_d + C(\underline{v}_d) \underline{v}_d + D(\underline{v}_d) \underline{v}_d + g(\underline{\eta}_d) = \underline{\tau}_d \\ \underline{\tau}_d = [\tau_{ud} \ 0 \ \tau_{rd}]^T \end{cases}$$

Coi nhiễu tác động là nhiễu ergodic, phân bố chuẩn và có kỳ vọng bằng 0. Kết quả mô phỏng hình 4 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).



Hình 4. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển RHC trên nền LQR cho điều khiển chuyển động tàu thủy bám quỹ đạo.

6. Kết luận

Đề tài đã xây dựng bộ điều khiển và thuật toán cho bộ điều khiển RHC trên nền LQR trong việc điều khiển bám theo quỹ đạo tham chiếu đặt trước. Kết quả bộ điều khiển cho chất lượng tốt và có khả năng kháng nhiễu. Quỹ đạo tàu bám theo quỹ đạo đặt với sai số nhỏ. Những nội dung sẽ tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện bộ điều khiển là: Xây bộ điều khiển RHC phản hồi đầu ra trong việc điều khiển bám theo quỹ đạo tham chiếu đặt trước với mô hình tàu có thêm thành phần bất định □

Tài liệu tham khảo

- [1] Nguyễn Doãn Phước (2010). *Tối ưu hóa trong điều khiển và điều khiển tối ưu*. Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.
- [2] Fossen, T.I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and sons.
- [3] Fossen T.I (2002): *Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles* vol. 28, 2002

- [4] Phuoc,N.D. (2018): Integrating the receding horizon LQR for nonlinear systems into intelligent control scheme. *Journal of military science and technology*. FEE-8/2018, pp.6-16
- [5] Tongwen,C. and Francis,B. (1995): *Optimal sampled data control systems*. London: Springer-Verlag.
- [6] Huibert,K. and Raphael,S. (1972): *Linear optimal control systems*. Wiley Interscience
- [7] Do K. D, Jie Pan (2009). *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*: Springer Science& Business Media, 2009
- [8] Bristow,D.A. et.al. (2006): A Survey of Iterative Learning Control: A learning-based method for high-performance tracking control. *IEEE control systems magazine*. Vol. 26. pp. 96-114, 2006.

Ngày nhận bài: 19/4/2019

Ngày chuyển phản biện: 23/4/2019

Ngày hoàn thành sửa bài: 14/5/2019

Ngày chấp nhận đăng: 21/5/2019